

SIMULASI PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASE YANG DIGERAKKAN DENGAN INVERTER FUZZY LOGIC

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh:

K A R N O

2294.100.058

PERPUSTAKAAN I T S

Tgl. Terima

31 - 7 - 2000

Terima Dari

H

No. Agenda Prp.

21.1419

RSE

629.89

Kar

3-1

2000



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2000**

**SIMULASI PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR
INDUKSI TIGA FASE YANG DIGERAKKAN
DENGAN INVERTER FUZZY LOGIC**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya**

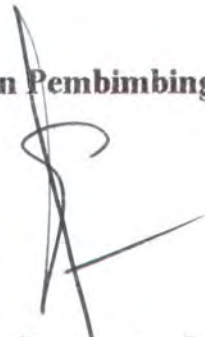
Mengetahui / Menyetujui

Dosen Pembimbing I



Dr. Ir. Mauridhi Hery P., M.Eng.
NIP. 131 569 364

Dosen Pembimbing II



Ir. Era Purwanto, M.Eng.
NIP. 131 651 885

SURABAYA

Pebruari, 2000



ABSTRAK

Abstrak

Metode pengaturan kecepatan motor induksi dengan *vector control* merupakan pengaturan arus stator secara vektorial. Metode ini didasarkan pada transformasi sistem tiga fase yang berubah terhadap waktu (*time variant system*) menjadi sistem koordinat ortogonal $d-q$ yang merupakan sistem tak berubah terhadap waktu (*time invariant system*). Transformasi ini mengubah arus stator tiga fase menjadi dua arus $d-q$, dimana arus pada sumbu d mempengaruhi besarnya fluks dan arus sumbu q mempengaruhi besarnya torsi motor. Kedua komponen arus $d-q$ ini kemudian dapat dikontrol dengan kontroler konvensional seperti kontroler proporsional integral sederhana. Metode *vector control* membutuhkan inverter sebagai penghubung sistem koordinat $d-q$ ke sistem tiga fase, banyak metode inverter yang telah digunakan dalam pengaturan kecepatan motor induksi. Dalam tugas akhir ini akan diteliti penggunaan kontroler logika fuzzy pada inverter sebagai pengendali kecepatan motor induksi. Kontroler logika fuzzy digunakan sebagai rangkaian *switching* inverter, perancangan inverter ini berdasarkan metode inverter yang telah ada. Inverter kontroler logika fuzzy yang dihasilkan kemudian diimplementasikan pada motor induksi sehingga didapatkan suatu bentuk inverter yang dapat mengontrol kecepatan motor induksi dengan respon yang cepat, halus dan presisi.

KATA PENGANTAR



KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Dengan mengucapkan puji syukur kehadiran Allah SWT, yang telah memberikan rahmat serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul :

SIMULASI PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASE YANG DIGERAKKAN DENGAN INVERTER FUZZY LOGIC

Tugas Akhir ini disusun guna memenuhi salah satu persyaratan akademis untuk memperoleh gelar **SARJANA TEKNIK ELEKTRO** pada **Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan – Jurusan Teknik Elektro – Fakultas Teknologi Industri – Institut Teknologi Sepuluh Nopember – Surabaya.**

Semoga hasil analisa dari Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak dan dapat diterima sebagai sumbangan pemikiran dalam rangka turut serta memikul tanggung jawab pembangunan teknologi pengaturan kecepatan motor induksi di Indonesia.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Surabaya, Pebruari 2000

Penulis

UCAPAN
TERIMA KASIH



UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, dengan terselesaikannya Tugas Akhir dan juga telah tersusunnya buku Tugas Akhir ini, kami menyampaikan rasa terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada :

1. Ayah, Ibu dan Kakak-kakakku yang tercinta, yang telah memberikan dorongan demi terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Bapak Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M. Eng, selaku dosen pembimbing I dan Bapak Ir Era Purwanto, M.Eng, selaku dosen pembimbing II, dengan segala ketekunan dan kesabarannya memberi bimbingan kepada kami.
3. Bapak Dr. Ir. Achmad Jazidie, M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri ITS.
4. Bapak Dr. Ir. Mochammad Rameli, selaku Koordinator Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan.
5. Rekan-rekan satu bimbingan, Tutus dan Maruli, sebagai rekan bertukar pikiran serta semua teman-teman asisten Lab SP.
6. Kawan-kawan kontrakan, Andik, Cahyo, Sakti, Rudi, Hendri, Tatak, Yuyus, Deni, Ridwan serta Dar, atas segala bantuannya baik secara langsung maupun tidak langsung.

Dan semua pihak yang tidak dapat kami sebutkan.

Semoga Allah swt membalas budi baik mereka yang telah membantu kami menyelesaikan Tugas Akhir ini.

DAFTAR ISI



DAFTAR ISI

	halaman
Judul	i
Lembar Pengesahan	ii
Abstrak	iii
Kata Pengantar	iv
Ucapan Terima Kasih	v
Daftar Isi	vi
Daftar Gambar	viii
Daftar Tabel	ix
 BAB I PENDAHULUAN	 1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Permasalahan	2
I.3 Tujuan	2
I.4 Batasan Masalah	2
I.5 Metodologi	3
I.6 Sistematika Pembahasan	4
I.7 Relevansi	5
 BAB II DASAR TEORI	 6
II.1 Motor Induksi	6
II.1.1 Model $d-q$ Motor Induksi	7
II.1.2 Model Arus Motor Induksi	10
II.2 Struktur Dasar Kontroler Logika Fuzzy	12
II.2.1 Fuzzifikasi	13
II.2.2 Basis Pengetahuan	13
II.2.3 Mekanisme <i>Reasoning</i>	14
II.2.3.1 MAX-MIN <i>fuzzy reasoning</i>	14
II.2.3.2 MAX-DOT <i>fuzzy reasoning</i>	15
II.2.4 Defuzzifikasi	16
II.2.4.1 <i>Mean of maximum</i> (MOM)	16

II.2.4.1 <i>Center of Area</i> (COA)	16
BAB III PEMBUATAN PROGRAM SIMULASI	18
III.1 <i>Vector Control</i> Motor Induksi	18
III.2 Diagram <i>Vector Control</i> Motor Induksi	20
III.3 Transformasi Vektor	21
III.3.1 Transformasi Clarke	21
III.3.2 Transformasi Park	22
III.4 Kontroler PI	23
✓ III.5 Inverter Menggunakan Kontroler Logika Fuzzy	23
III.5.1 Fungsi Keanggotaan Dari Kontroler Logika Fuzzy	24
III.5.2 Pembuatan Aturan Dasar (<i>Rules Base</i>)	26
III.5.3 Defuzzifikasi	30
BAB IV SIMULASI PROGRAM DAN ANALISA	31
IV.1 Perbandingan dengan <i>Switching Inverter</i>	35
IV.2 Simulasi dengan Perubahan Nilai Kontroler Proporsional Integral ...	36
IV.3 Simulasi dengan Perubahan Nilai Pengali Fungsi Keanggotaan Fuzzy	38
BAB V PENUTUP	41
V.1 Kesimpulan	41
V.2 Saran-saran	42
DAFTAR PUSTAKA	43
LAMPIRAN-LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

	halaman
Gambar 2.1 Kumparan motor induksi tiga fase simetris	7
Gambar 2.2 Transisi 3 fase ke model d-q	9
Gambar 2.3 Struktur dasar kontroler logika fuzzy	12
Gambar 2.4 MAX-MIN fuzzy reasoning	15
Gambar 2.5 MAX-DOT fuzzy reasoning	15
Gambar 3.1 Vektor fluks dan arus stator	18
Gambar 3.2 Skema dasar <i>vector control</i> motor induksi	19
Gambar 3.3 Vektor arus stator dan komponennya (α, β)	21
Gambar 3.4 Vektor arus stator dengan komponen α, β dan $d-q$	22
Gambar 3.5 Struktur KLF dengan dua input dan tiga output	24
Gambar 3.6 Fungsi keanggotaan input v_{aref} dan $v_{\beta ref}$	25
Gambar 3.7 Fungsi keanggotaan output U_a, U_b, U_c	25
Gambar 3.8 Algoritma inverter <i>space vector</i>	26
Gambar 4.1 Respon open loop dengan $f : 50 \text{ Hz}$	31
Gambar 4.2 Respon sistem dengan $K_p : 0.00008$ $K_i : 0.5$ $a : 4$ $b : 0.3$	32
Gambar 4.3 Respon kecepatan motor pada kecepatan rendah	33
Gambar 4.4 Respon kecepatan motor pada kecepatan tinggi	33
Gambar 4.5 Pengaruh kenaikan kecepatan motor	34
Gambar 4.6 Pengaruh penurunan kecepatan motor	34
Gambar 4.7 Respon sistem dengan <i>switching inverter</i>	35
Gambar 4.8 Respon terbaik sistem dengan $K_p : 0.00008, K_i : 1, a : 4, b : 0.1$..	40

DAFTAR TABEL

	halaman
Tabel 3.1 Tegangan output inverter <i>space vector</i>	27
Tabel 3.2 Aturan dasar untuk output U_a	29
Tabel 3.3 Aturan dasar untuk output U_b	29
Tabel 3.4 Aturan dasar untuk output U_c	29
Tabel 4.1 Karakteristik respon untuk perubahan kontroler PI, Kecepatan input : 1500 rpm	36
Tabel 4.2 Karakteristik respon untuk perubahan kontroler PI, Kecepatan input : 750 rpm	37
Tabel 4.3 Karakteristik respon untuk perubahan kontroler PI, Kecepatan input : 3000 rpm	37
Tabel 4.4 Karakteristik respon untuk perubahan faktor pengali fuzzy, Kecepatan input : 1500 rpm	38
Tabel 4.5 Karakteristik respon untuk perubahan faktor pengali fuzzy, Kecepatan input : 750 rpm	39
Tabel 4.6 Karakteristik respon untuk perubahan faktor pengali fuzzy, Kecepatan input : 3000 rpm	39

PENDAHULUAN



BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Motor induksi merupakan jenis motor yang umum digunakan karena motor ini tidak mahal serta mempunyai kehandalan yang baik, motor ini telah banyak digunakan dalam aplikasi industri seperti pompa dan *blower*. Secara konvensional motor induksi dioperasikan pada kecepatan yang tetap sesuai dengan frekuensi sumber tegangan serta jumlah kutub dari motor induksi. Pengaturan kecepatan pada motor induksi jauh lebih sulit dibandingkan dengan motor arus searah karena tidak ada hubungan yang linier antara arus motor dan torsi yang dihasilkan seperti pada motor arus searah. Sehingga diperlukan metode yang dapat digunakan untuk mengubah kecepatan motor induksi dengan rentang kecepatan yang besar serta presisi dan respon dinamis yang baik.

Suatu metode yang kemudian disebut sebagai *vector control* digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi pada rentang kecepatan yang besar serta presisi dan respon yang cepat. Pada *vector control* (disebut juga *Field Oriented Control*), pengaturan motor induksi ini telah diubah seperti pengaturan motor arus searah, sehingga dalam pengaturan motor induksi dapat digunakan berbagai kontroler seperti pada pengaturan kecepatan motor arus searah. Salah satu kontroler yang dapat diterapkan pada motor induksi adalah kontroler logika fuzzy, kontroler ini telah berhasil dalam pengaturan sistem atau *plant* yang cukup kompleks dengan baik.

I.2 Permasalahan

Pengaturan kecepatan motor induksi dengan metode *vector control* memerlukan inverter untuk memberikan tegangan pada motor. Pada beberapa tulisan telah diteliti pengaturan kecepatan motor induksi dengan menggunakan *switching inverter* dimana tegangan yang diberikan pada motor induksi mempunyai perubahan hanya berkisar pada satu atau nol.

Permasalahan yang timbul adalah bagaimana memperbaiki proses *switching* dari inverter sehingga diperoleh pengaturan kecepatan motor induksi dengan respon yang lebih cepat dan halus. Permasalahan selanjutnya adalah bagaimana bentuk kontroler logika fuzzy yang tepat yang dapat diterapkan sebagai inverter motor induksi.

I.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk menerapkan kontroler logika fuzzy pada pengaturan kecepatan motor induksi terutama pada proses *switching* dari inverter sehingga didapatkan suatu bentuk kontroler logika fuzzy yang sesuai dalam pengaturan kecepatan motor induksi dengan respon dinamis yang halus, cepat dan presisi.

I.4 Batasan Masalah

Pada penelitian tugas akhir ini pembahasan dilakukan dengan batasan-batasan masalah sebagai berikut :

1. Desain kontroler diarahkan pada kontroler logika fuzzy dinamis, melalui perubahan fungsi keanggotaan dari input dan output.
2. *Plant* akan dibahas secara umum, dan model matematika dari *plant* diambil dari referensi yang ada.
3. Motor induksi yang dipakai sebagai *plant* pada tugas akhir ini merupakan motor induksi tiga fase rotor sangkar yang terhubung bintang dengan distribusi kumparan yang simetris sinusoidal tanpa beban.
4. Pada penelitian tugas akhir ini hanya akan dibahas dan dirancang program untuk simulasi.

I.5 Metodologi

Pemodelan motor induksi menjadi model $d-q$ sehingga memungkinkan dilakukannya pengaturan kecepatan motor induksi dengan metode *vector control*, merupakan hal awal yang menjadi konsep tugas akhir ini disamping konsep tentang kontroler logika fuzzy. Perancangan blok diagram pengaturan kecepatan motor induksi secara keseluruhan dibuat berdasarkan metode *vector control*.

Inverter yang merupakan penghubung antara motor induksi dengan kontrolernya dibuat dengan menggunakan kontroler logika fuzzy. Pembuatan inverter menggunakan kontroler logika fuzzy ini meliputi desain input output dan fungsi keanggotaannya, desain aturan dasar yang diturunkan dari metode inverter yang telah ada.

Simulasi desain program diatas dilakukan pada motor induksi dengan beberapa variabel perubah yaitu inverter kontroler logika fuzzy dengan berbagai

kecepatan motor, dari sini dapat ditemukan bentuk inverter kontroler logika fuzzy yang tepat untuk pengaturan kecepatan motor induksi.

I.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan pada laporan tugas akhir ini berdasarkan pada pokok bahasan yang ada dengan format bab, yang terdiri dari lima pokok bahasan, yaitu :

1. Bab I Pendahuluan

Berisi tentang penjelasan latar belakang masalah, permasalahan, tujuan tugas akhir, batasan masalah serta sistematika pembahasan laporan tugas akhir ini.

2. Bab II Dasar Teori

Memberi gambaran secara umum konsep teori yang mendasari perancangan yang meliputi konsep dasar kontroler logika fuzzy serta konsep dasar motor induksi dan pemodelannya.

3. Bab III Pembuatan Program Simulasi

Membahas tentang perancangan program simulasi meliputi desain diagram *vector control* yang akan dibuat dengan kontrolernya. Melakukan perancangan inverter kontroler logika fuzzy yang meliputi desain fungsi keanggotaan input output serta aturan dasar. Dari sini dapat dibuat program simulasi.

4. Bab IV Simulasi Program dan Analisa

Program simulasi yang telah dibuat disimulasikan pada motor induksi. Simulasi dilakukan dengan melakukan percobaan perubahan nilai atau bentuk dari inverter kontroler logika fuzzy serta kontroler proporsional integral. Hasil

percobaan kemudian dianalisa sehingga diperoleh bentuk inverter kontroler logika fuzzy yang sesuai untuk motor induksi.

5. Bab V Penutup

Menutup pembahasan laporan tugas akhir, dengan memberikan kesimpulan tentang perancangan yang telah dilakukan dan saran-saran mengenai kemungkinan pengembangan lebih lanjut.

1.7 Relevansi

Dari tugas akhir ini diharapkan didapatkan suatu bentuk inverter kontroler logika fuzzy yang dapat digunakan untuk pengaturan kecepatan motor induksi dengan metode *vector control*. Pengembangan lebih lanjut dapat dilakukan dengan menerapkan inverter kontroler logika fuzzy secara langsung pada motor serta perbaikan pada inverter kontroler logika fuzzy itu sendiri.

DASAR TEORI



BAB II

DASAR TEORI

II.1 Motor Induksi

Motor induksi sesuai dengan namanya merupakan motor yang bekerja dengan menggunakan prinsip induksi medan magnet. Medan putar yang timbul pada kumparan stator akan memotong konduktor pada kumparan rotor sehingga menimbulkan tegangan induksi dan timbullah arus karena kumparan rotor terhubung singkat. Dengan timbulnya arus rotor maka pada rotor timbul gaya akibat interaksi arus rotor dalam medan putar stator, dengan gaya ini maka rotor akan berputar mengikuti atau searah medan putar stator.

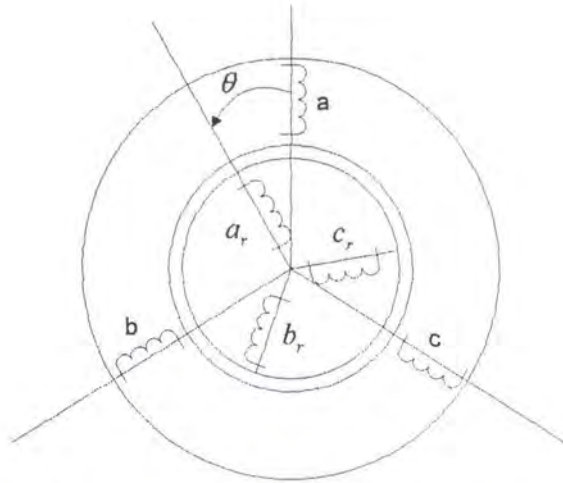
Kumparan dari motor induksi tiga fase secara skematis dapat digambarkan seperti pada gambar 2.1. dimana kumparan rotor sangkar dimodelkan sebagai kumparan tiga fase. Sebagai asumsi pertama bahwa kumparan stator dan rotor diasumsikan terdistribusi sinusoidal secara merata sehingga *mmf* ruang harmonisa dan celah harmonisa dapat diabaikan.

Persamaan tegangan untuk fase *a* pada stator dan fase *a* pada rotor dinyatakan dapat sebagai berikut¹ :

$$i_{as}R_s - v_s = -\frac{d\lambda_{as}}{dt} \quad (2.1)$$

$$i_{ar}R_r - v_r = -\frac{d\lambda_{ar}}{dt} \quad (2.2)$$

¹ Ion Boldea, Syed A Nasar, Vector Control of AC Drives, CRC Press Inc., 1992 p. 28



Gambar 2.1 Kumparan motor induksi tiga phasa simetris²

II.1.1 Model d - q Motor Induksi

Pada model motor induksi gambar 2.1 diatas apabila dibuat suatu sumbu koordinat d - q seperti gambar 2.2, dimana koordinat ini turut berputar sesuai dengan kecepatan sinkron dari motor maka akan didapatkan bentuk atau model transisi dari tiga fase ke dalam model d - q . Dengan pemodelan d - q seperti diatas maka kita dapat menyatakan persamaan untuk stator dan rotor sebagai berikut³ :

1. Tegangan stator

Persamaan tegangan stator dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\lambda}_s}{dt} + j\omega_s \bar{\lambda}_s \quad (2.3)$$

$$\text{dimana,} \quad \bar{v}_s = v_{ds} + jv_{qs} \quad (2.4)$$

$$\bar{i}_s = i_{ds} + ji_{qs} \quad (2.5)$$

$$\bar{\lambda}_s = \lambda_{ds} + j\lambda_{qs} \quad (2.6)$$

² Ibid.

³ Ibid., pp. 31-34

2. Tegangan rotor

Persamaan tegangan rotor dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\bar{v}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\lambda}_r}{dt} + j(\omega_s - \omega_r)\bar{\lambda}_r \quad (2.7)$$

dimana, $\bar{v}_r = v_{dr} + jv_{qr} \quad (2.8)$

$$\bar{i}_r = i_{dr} + ji_{qr} \quad (2.9)$$

$$\bar{\lambda}_r = \lambda_{dr} + j\lambda_{qr} \quad (2.10)$$

3. Flux Linkage

Flux Linkage merupakan besarnya medan putar pada kumparan stator dan kumparan rotor. Besar *flux linkage* pada kumparan rotor dan stator adalah :

$$\bar{\lambda}_s = L_s \bar{i}_s + M \bar{i}_r \quad (2.11)$$

$$\bar{\lambda}_r = L_r \bar{i}_r + M \bar{i}_s \quad (2.12)$$

4. Torsi Elektromagnetik

Torsi elektromagnetik merupakan fungsi dari arus stator dan rotor, sebagai berikut:

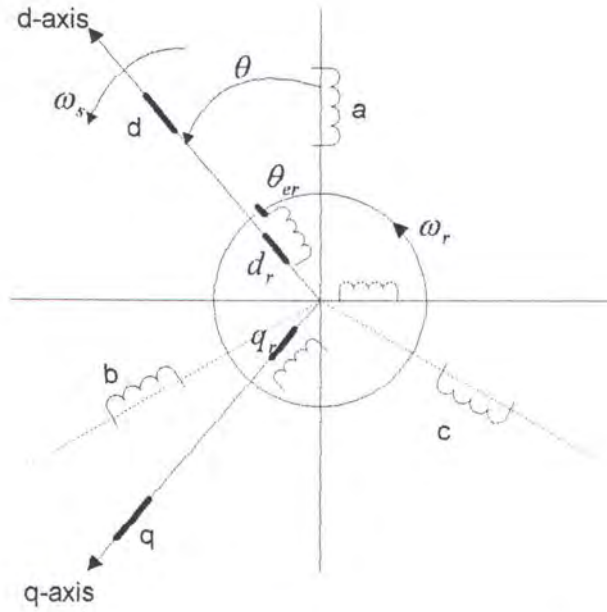
$$T_e = \frac{3}{2} PM (i_{dr} i_{qs} - i_{ds} i_{qr}) \quad (2.13)$$

5. Kecepatan putaran motor dan posisi rotor

Kecepatan putaran motor dan posisi rotor merupakan fungsi dari torsi motor dan torsi beban sebagai berikut :

$$\frac{J}{P} \frac{d}{dt} \omega_r + K_d \omega_r = T_e - T_L \quad (2.14)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \quad (2.15)$$



Gambar 2.2 Transisi 3 fase ke model $d-q$ ⁴

Dengan menggabungkan persamaan (2.3) sampai persamaan (2.12) maka akan didapatkan suatu bentuk persamaan yang menyatakan hubungan tegangan dan arus dari motor induksi pada sumbu $d-q$ sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_s L_s & pM & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s + pL_s & \omega_s M & pM \\ pM & -(\omega_s - \omega_r)M & R_s + pL_r & -(\omega_s - \omega_r)L_r \\ (\omega_s - \omega_r)M & pM & (\omega_s - \omega_r)L_r & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

dimana $v_r = 0$, $p = \frac{d}{dt}$. Jika ditinjau pada koordinat stasioner dimana $\omega_s = 0$

maka persamaan (2.16) dapat ditulis kembali sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pM & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pM \\ pM & \omega_r M & R_s + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r M & pM & -\omega_r L_r & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

⁴ Ibid. p. 35

II.1.2 Model Arus Motor Induksi

Dengan menggabungkan persamaan tegangan stator persamaan (2.3) sampai persamaan (2.6) dan persamaan flux satator (2.11) maka didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} V_{ds} + jV_{qs} = & R_s I_{ds} + jR_s I_{qs} + L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + jL_s \frac{dI_{qs}}{dt} + M \frac{dI_{dr}}{dt} + jM \frac{dI_{qr}}{dt} \\ & + j\omega_s L_s I_{ds} - \omega_s L_s I_{qs} + j\omega_s M I_{dr} - \omega_s M I_{qr} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Demikian pula untuk persamaan tegangan rotor akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} V_{dr} + jV_{qr} = & R_r I_{dr} + jR_r I_{qr} + L_r \frac{dI_{dr}}{dt} + jL_r \frac{dI_{qr}}{dt} + M \frac{dI_{ds}}{dt} + jM \frac{dI_{qs}}{dt} \\ & + j(\omega_s - \omega_r) L_r I_{dr} - (\omega_s - \omega_r) L_r I_{qr} + j(\omega_s - \omega_r) M I_{ds} - (\omega_s - \omega_r) M I_{qs} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Dari persamaan (2.18) dengan memisahkan bagian real dan imajineranya maka dapat ditulis dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{dr} \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_r M^2 & R_r M & \omega_r L_r M \\ R_s M & -\omega_r L_s M & -R_r L_s & \omega_r L_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{1}{D} \begin{bmatrix} L_r & 0 & -M & 0 \\ -M & 0 & L_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

dimana $D = L_r L_s - M^2$, sedangkan untuk persamaan (2.19) dapat ditulis kembali sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{qs} \\ \dot{I}_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} -\omega_r M^2 & R_s L_r & -\omega_r L_r M & R_r M \\ \omega_r L_s M & R_s M & \omega_r L_r L_s & -R_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{1}{D} \begin{bmatrix} 0 & L_r & 0 & -M \\ 0 & -M & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Dengan menggabungkan persamaan (2.20) dan (2.21) maka didapatkan persamaan arus motor induksi secara lengkap sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qs} \\ \dot{I}_{dr} \\ \dot{I}_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_r M^2 & R_r M & \omega_r L_r M \\ -\omega_r M^2 & -R_s L_r & -\omega_r L_r M & R_r M \\ R_s M & -\omega_r L_s M & -R_r L_s & -\omega_r L_r L_s \\ \omega_r L_s M & R_s M & \omega_r L_r L_s & -R_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{1}{D} \begin{bmatrix} L_r & 0 & -M & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -M \\ -M & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Persamaan (2.22) merupakan model arus dari motor induksi yang dapat dipakai untuk simulasi, penyelesaian persamaan ini membutuhkan informasi yang lengkap tentang parameter motor. Tegangan dan arus pada persamaan (2.22) merupakan variabel dengan referensi sumbu d - q , dimana referensi ini merupakan transformasi dari koordinat tiga fase dengan transformasi Park sebagai berikut⁵ :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & \cos\left(-\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(-\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(-\theta) & \sin\left(-\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(-\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

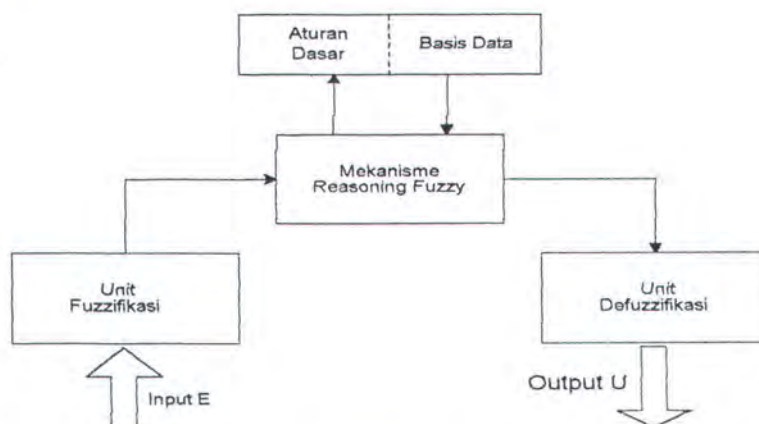
transformasi ini juga berlaku untuk arus stator.

⁵ Ibid. p. 35

II.2 Struktur Dasar Kontroler Logika Fuzzy

Pada sistem logika fuzzy pendekatan terhadap nilai besaran input, output dan respon kontrol dispesifikasikan dengan istilah seperti yang digunakan manusia. Model matematik dari sistem yang kompleks tidak lagi diperlukan, pengetahuan dan pengalaman tentang suatu sistem lebih diperlukan sebagai aturan dasar dari kontroler logika fuzzy.

Struktur dasar dari kontroler logika fuzzy mempunyai beberapa komponen pokok seperti gambar 2.3. Dari gambar 2.3 kontroler logika fuzzy mempunyai komponen utama yaitu unit fuzzifikasi, unit *reasoning*, pengetahuan dasar yang terdiri dari aturan dasar dan basis data serta unit defuzzifikasi. Bentuk dari kontroler logika fuzzy (KLF) dapat berubah-ubah sesuai dengan keperluan desain, KLF dapat mempunyai fungsi keanggotaan yang statik maupun dinamis disamping itu aturan dasar dari KLF juga dapat statik juga dapat dibuat mempunyai kemampuan untuk melakukan pembelajaran sehingga aturan dasar bersifat dinamis.



Gambar 2.3 Struktur Dasar Kontroler Logika Fuzzy⁶

⁶ Jun Yan, Michael Ryan, James Power, Using Fuzzy Logic, Prentice Hall, 1994, p. 47

II.2.1 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi adalah proses pemetaan dari input ke himpunan fuzzy pada berbagai variasi input. Proses ini dapat dinyatakan sebagai :

$$x = \text{fuzzier}(x_0) \quad (2.24)$$

dimana x_0 adalah harga *crisp* dari variabel input pada proses, x adalah vektor fuzzy set yang didefinisikan untuk variabel, dan *fuzzier* adalah operator fuzzifikasi yang memetakan data *crisp* ke himpunan fuzzy. Proses pemetaan ini mengikuti aturan fungsi keanggotaan yang terdapat pada basis data.

II.2.2 Basis Pengetahuan

Basis pengetahuan terdiri atas basis data dan aturan dasar. Basis data menyediakan batasan yang dibutuhkan dari parameter fuzzy sebagai kelompok fuzzy dengan fungsi keanggotaan yang didefinisikan pada semesta pembicaraan untuk tiap variabel. Basis data meliputi himpunan semesta dari tiap variabel, penentuan jumlah himpunan fuzzy dan desain fungsi keanggotaan.

Aturan dasar terdiri atas aturan kontrol fuzzy yang dibutuhkan untuk mencapai tujuan pengontrolan. Aturan dasar dibuat berdasarkan pengetahuan serta pengalaman tentang perilaku dari suatu sistem.

II.2.3 Mekanisme Reasoning

Berbagai cara telah digunakan untuk menentukan aturan mana yang digunakan berdasar dari nilai input dalam penentuan aksi kontrol yang sesuai. Ada dua metode *reasoning* yang sering digunakan saat ini yaitu⁷ :

- Metode MAX – MIN *fuzzy reasoning*
- Metode MAX – DOT *fuzzy reasoning*

Mekanisme *reasoning* dapat ditunjukkan sebagai berikut, diasumsikan ada dua buah aturan kontrol :

Aturan 1 : Jika x adalah A_1 dan y adalah B_1 maka z adalah C_1

Aturan 2 : Jika x adalah A_2 dan y adalah B_2 maka z adalah C_2

Fire strength dari aturan ke i dinotasikan sebagai α_i . Untuk input x_o dan y_o *fire strength* α_1 dan α_2 dari aturan dasar dinotasikan sebagai :

$$\alpha_1 = \mu_{A1}(x_o) \wedge \mu_{B1}(y_o) \quad (2.25)$$

$$\alpha_2 = \mu_{A2}(x_o) \wedge \mu_{B2}(y_o) \quad (2.26)$$

II.2.3.1 MAX-MIN *fuzzy reasoning*

Dalam MAX-MIN *fuzzy reasoning* aturan operasi minimum Mamdani R_c digunakan untuk implikasi fuzzy.

$$\mu_C(w) = (\alpha_1 \wedge \mu_{C1}(w)) \vee (\alpha_2 \wedge \mu_{C2}(w)) \quad (2.27)$$

Gambar 2.4 menunjukkan proses *inference* MAX-MIN untuk input *crisp* x_o dan y_o yang dianggap sebagai *fuzzy singletons*.

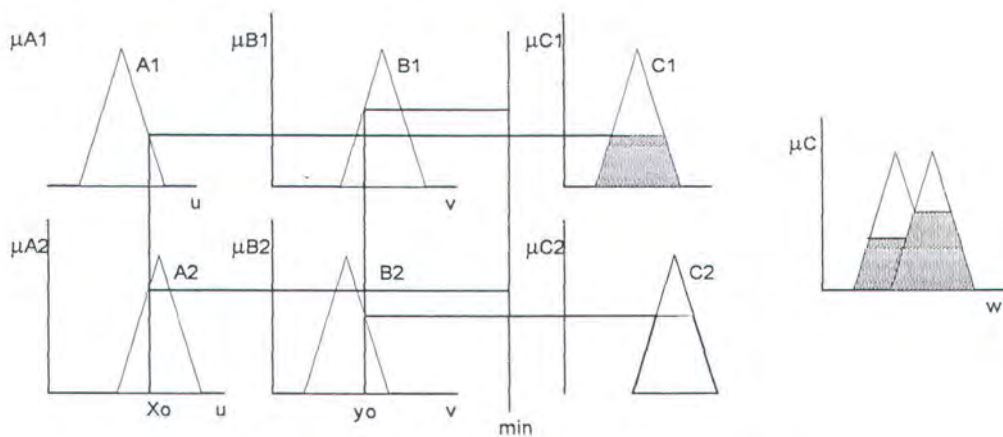
⁷ Ibid. p. 54

II.2.3.2 MAX-DOT fuzzy reasoning

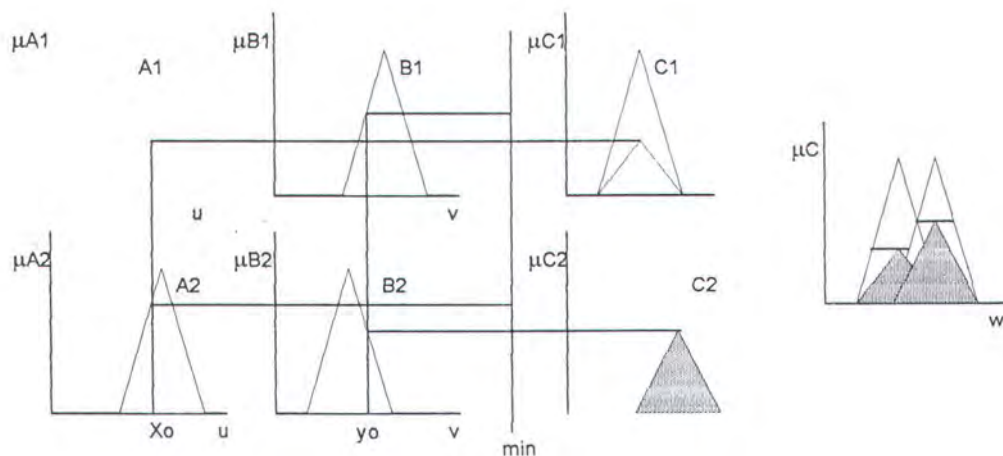
Dalam MAX-DOT fuzzy reasoning, hasil aturan operasi Larsen digunakan sebagai fungsi implikasi fuzzy.

$$\mu_C(w) = (\alpha_1 \cdot \mu_{C1}(w)) \vee (\alpha_2 \cdot \mu_{C2}(w)) \quad (2.28)$$

Gambar 2.5 menunjukkan proses *inference* MAX-DOT untuk input *crisp* x_o dan y_o yang dianggap sebagai fuzzy *singletons*.



Gambar 2.4 MAX-MIN fuzzy reasoning⁸



Gambar 2.5 MAX-DOT fuzzy reasoning⁹

⁸ Ibid. p. 55

⁹ Ibid. p. 55

II.2.4 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi adalah proses pemetaan dari daerah aksi kontrol fuzzy ke daerah aksi kontrol non-fuzzy (*crisp*). Ini dapat dinyatakan sebagai :

$$y_o = \text{defuzzier}(y) \quad (2.29)$$

pada implementasi kontrol logika fuzzy, defuzzifikasi yang sering digunakan adalah *mean of maximum* (MOM) dan *center of area* (COA).

II.2.4.1 Mean of maximum (MOM)

MOM menghasilkan aksi kontrol yang mana merepresentasikan harga rata-rata dari semua aksi kontrol lokal yang fungsi keanggotaannya mencapai maximum. Harga *crisp* aksi kontrol menggunakan MOM dinyatakan sebagai¹⁰ :

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i H_i W_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i H_i} \quad (2.30)$$

dimana α_i adalah *fire strength* dari aturan ke i , H_i adalah harga saat fungsi keanggotaan mencapai maksimum dan W_i adalah harga *crisp* output dalam semesta pembicaraan.

II.2.4.1 Center of Area (COA)

Defuzzifikasi COA menghasilkan pusat gravitasi dari distribusi aksi kontrol. Ini dinyatakan sebagai¹¹ :

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i M_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i A_i} \quad (2.31)$$

¹⁰ Ibid. p. 56

¹¹ Ibid. p. 56

dimana α_i adalah *fire strength* dari aturan ke i , M_i adalah momen pada aturan ke i , dan A_i adalah daerahnya.

PEMBUATAN PROGRAM SIMULASI



BAB III

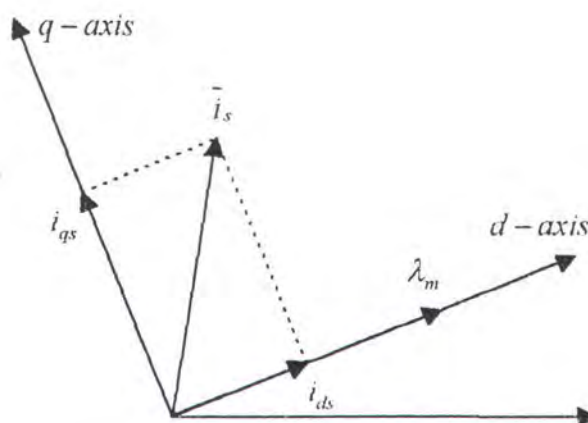
PEMBUATAN PROGRAM SIMULASI

III.1 Vector Control Motor Induksi

Vector control merupakan pemisahan (*decoupled*) pengaturan dari fluks dan torsi motor induksi. Pemodelan motor induksi dengan model *d-q* merupakan kunci dari *vector control*. Pengaturan level fluks digunakan untuk menghindari saturasi dan mengurangi rugi-rugi pada berbagai kondisi operasi. Dengan membuat fluks konstan maka akan didapatkan respon torsi yang cepat sehingga menghasilkan respon kecepatan atau posisi yang cepat pula.

Dari gambar 3.1 dimana fluks $\bar{\lambda}_m$ berhimpit dengan sumbu *d* sehingga fluks dan arus stator dapat dinyatakan¹² :

$$\begin{aligned}\bar{\lambda}_m &= \lambda_m \\ \bar{i}_s &= i_{ds} + j i_{qs}\end{aligned}\tag{3.1}$$



Gambar 3.1 Vektor fluks dan arus stator¹³

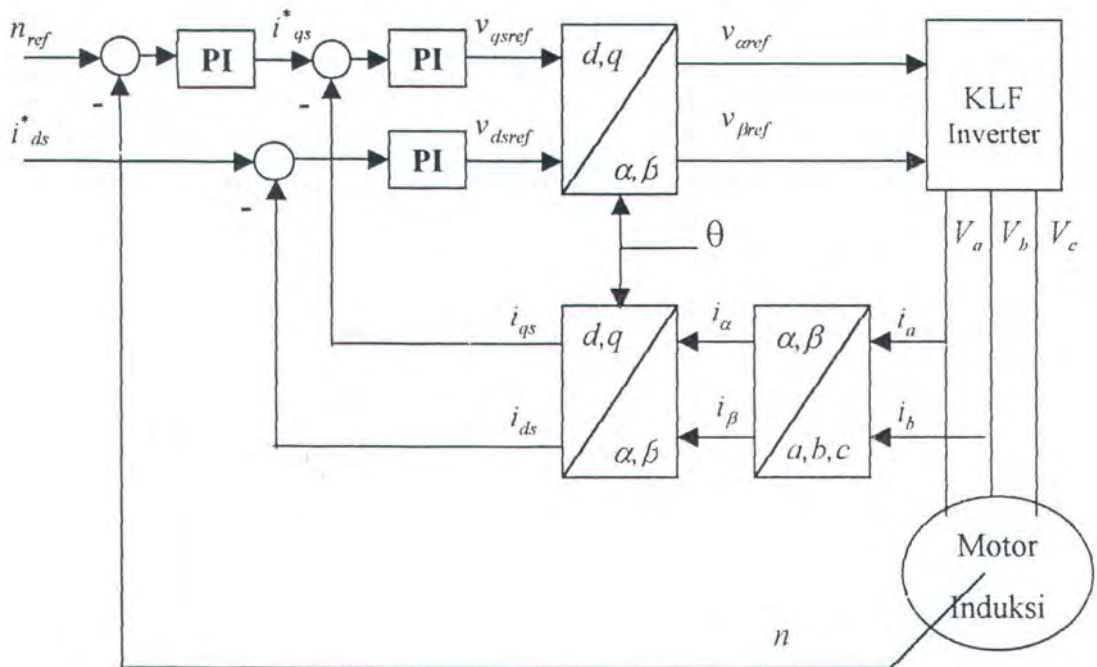
¹² Ion Boldea, Syed A Nasar, Vector Control of AC Drives, CRC Press Inc., 1992, p. 48

¹³ Ibid.

Persamaan torsi motor dapat dinyatakan kembali sebagai berikut¹⁴ :

$$T_e = \frac{3}{2} P \operatorname{Re}(j \bar{\lambda}_m \bar{i}_s) = \frac{3}{2} P \operatorname{Re}(j \bar{\lambda}_m (i_{ds} - j i_{qs})) = \frac{3}{2} P \lambda_m i_{qs} \quad (3.2)$$

Dari persamaan (3.2) torsi motor hanya tergantung pada nilai dari arus stator komponen sumbu q i_{qs} , serta fluks motor $\bar{\lambda}_m$. Sedangkan komponen arus stator yang lain i_{ds} mempengaruhi besarnya fluks $\bar{\lambda}_m$. Persamaan torsi dari motor induksi ini terlihat seperti persamaan torsi motor arus searah. Dengan mengatur baik fluks maupun arus stator i_{qs} maka kita dapat mengatur torsi motor induksi dengan kata lain dapat mengatur kecepatan dari motor induksi dengan mudah.



Gambar 3.2 Skema dasar *vector control* motor induksi

¹⁴ Ibid. p. 49

III.2 Diagram *Vector Control* Motor Induksi

Secara umum skema dasar dari *vector control* dari motor induksi ditunjukkan seperti gambar 3.2. Pengaturan torsi motor induksi dengan mengatur arus stator pada komponen sumbu d - q memerlukan dua input referensi arus stator i_{ds}^* (referensi fluks) disebut juga arus medan i_m^* dan arus stator i_{qs}^* (referensi torsi) disebut juga arus torsi i_t^* . Referensi fluks i_{ds}^* dibuat konstan dengan besar 0.08 A, sedangkan referensi torsi i_{qs}^* merupakan keluaran dari pengaturan referensi kecepatan.

Dua buah arus fasa i_a dan i_b diukur dari kumparan stator motor, arus ini kemudian ditransformasikan ke sumbu α, β menghasilkan dua arus $i_{s\alpha}$ dan $i_{s\beta}$. Dua komponen arus ini kemudian ditransformasikan ke sistem koordinat putar d - q dengan transformasi Park, didapatkan dua komponen arus stator i_{ds} dan i_{qs} . Kedua komponen arus ini dibandingkan dengan referensi i_{ds}^* (referensi fluks) dan i_{qs}^* (referensi torsi). Hasil dari pengaturan kedua komponen arus yaitu v_{dsref} dan v_{qsref} yang kemudian ditransformasikan kembali ke sumbu α, β . Tegangan v_{aref} dan v_{bref} merupakan dua input bagi kontroler logika fuzzy, keluaran dari kontroler ini berupa tiga buah output U_a, U_b, U_c , output ini dikalikan dengan konstanta menghasilkan tegangan V_a, V_b, V_c yang di suplai ke motor. Blok diagram pengaturan motor induksi diatas memerlukan informasi dari motor berupa arus stator fase a dan fase b , kecepatan rotor serta posisi rotor θ yang dipergunakan untuk transformasi vektor.

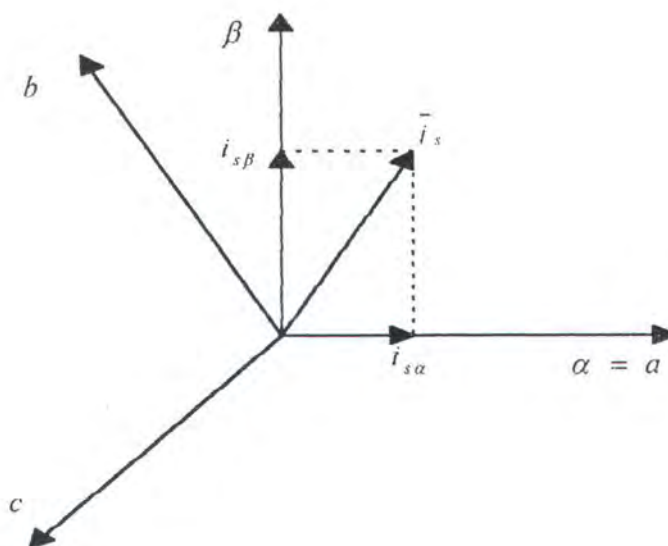
III.3 Transformasi Vektor

Transformasi vektor merupakan salah satu kunci dari *vector control*, dimana besaran tiga fase yang berubah terhadap waktu diubah menjadi besaran yang konstan sehingga memungkinkan untuk dikontrol dengan berbagai kontroler.

III.3.1 Transformasi Clarke

Transformasi Clarke mengubah besaran tiga fase menjadi dua komponen ortogonal, transformasi ini dapat diilustrasikan seperti gambar 3.3, dengan hubungan kedua sistem koordinat sebagai berikut:

$$\begin{aligned} i_{s\alpha} &= i_a \\ i_{s\beta} &= \frac{1}{\sqrt{3}} i_a + \frac{2}{\sqrt{3}} i_b \end{aligned} \quad (3.3)$$



Gambar 3.3 Vektor Arus Stator dan komponennya (α, β)¹⁵

¹⁵ —, Field Oriented Control of 3-Phase AC-Motors, Texas Instruments Europe, February 1998. <URL: <http://www.ti.com>>, p. 4

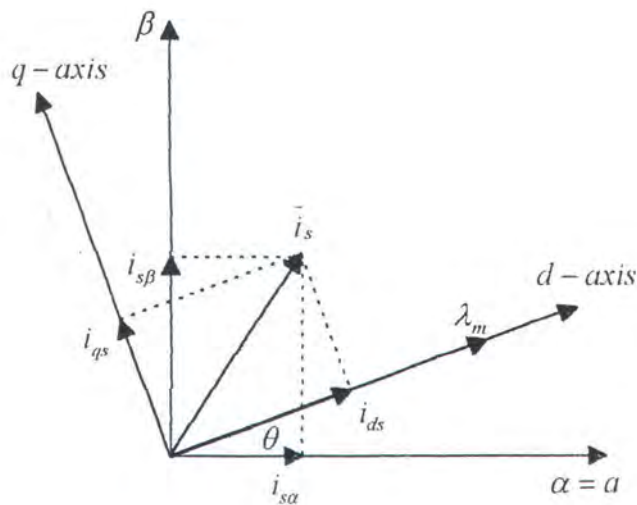
Transformasi ini menghasilkan dua komponen ortogonal (α, β) dimana besarnya masih berubah terhadap waktu (*time variant*).

III.3.2 Transformasi Park

Transformasi ini mengubah sistem ortogonal dua fase (α, β) ke sistem koordinat putar d - q . Dengan membuat sumbu d berimpit dengan flux utama seperti gambar 3.4 kita dapatkan hubungan dua koordinat ini sebagai berikut :

$$\begin{aligned} i_{ds} &= i_{s\alpha} \cos \theta + i_{s\beta} \sin \theta \\ i_{qs} &= -i_{s\alpha} \sin \theta + i_{s\beta} \cos \theta \end{aligned} \quad (3.4)$$

dimana θ merupakan posisi rotor. Dari transformasi ini didapatkan dua komponen koordinat yang *time invariant*, dengan dua komponen ini i_{ds} (komponen flux) dan i_{qs} (komponen torsi) kita dapat mengontrol motor induksi seperti mengontrol motor arus searah.



Gambar 3.4 Vektor Arus stator dengan komponen α, β dan d - q ¹⁶

¹⁶ Ibid. p. 4

III.4 Kontroler PI

Dalam perancangan *vector control* motor induksi seperti gambar 3.2 terdapat dua buah jenis umpanbalik, umpanbalik luar yaitu kecepatan dan umpan balik dalam yaitu arus $d-q$. Umpan balik kecepatan dengan referensi kecepatan dapat digunakan kontroler PI yang sederhana, demikian pula untuk umpan balik arus dimana i_{ds}^* dan i_{qs}^* merupakan input referensi dapat dipergunakan kontroler PI sederhana. Bentuk kontroler PI yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah¹⁷ :

$$U_k = K_p e_k + K_i e_k + \sum_{n=0}^{k-1} e_n \quad (3.5)$$

dimana U_k, K_p, K_i, e_k berturut-turut adalah aksi kontrol, konstanta proporsional, konstanta integral dan sinyal eror.

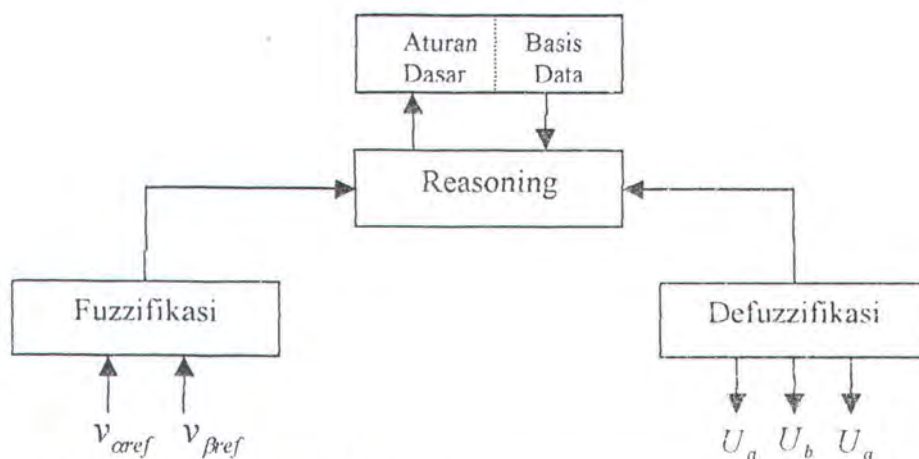
Pemilihan nilai konstanta PI yang tepat akan memperbaiki respon dari motor induksi, dalam penelitian ini akan dicoba beberapa kombinasi sehingga ditemukan konstanta yang tepat.

III.5 Inverter Menggunakan Kontroler Logika Fuzzy

Dari diagram pengaturan kecepatan motor induksi gambar 3.2 dibutuhkan suatu inverter, inverter ini berfungsi sebagai pemberi tegangan langsung ke motor. Pemberian tegangan ke motor oleh inverter ini berdasarkan input yaitu v_{uref} dan v_{breff} . Telah banyak dikembangkan algoritma untuk inverter ini diantaranya

¹⁷ Ibid. p. 8

adalah *switching inverter* dimana keluaran dari inverter ini adalah tegangan maks, min atau nol saja. Dalam penelitian tugas akhir ini akan dikembangkan inverter jenis sumber tegangan (*voltage source inverter*) dengan menggunakan kontroler logika fuzzy sebagai algoritma *switching* dari inverter. Penggunaan kontroler logika fuzzy diharapkan dapat memperbaiki respon dari motor induksi. Secara umum bentuk dari kontroler logika fuzzy yang akan digunakan sebagai inverter pada motor induksi seperti gambar 3.5.



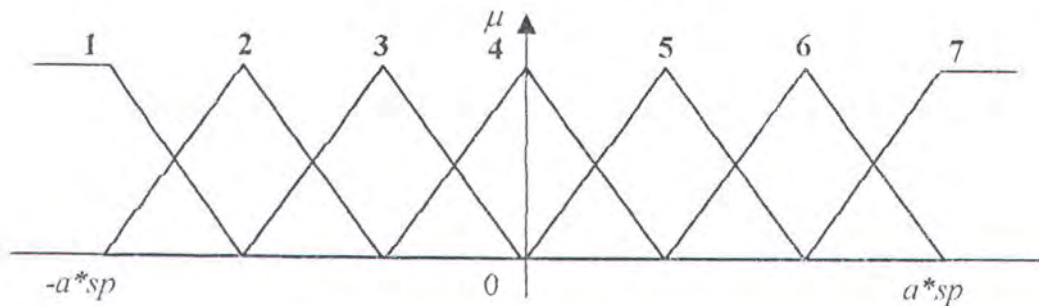
Gambar 3.5 Struktur KLF dengan dua input dan tiga output

Kontroler logika fuzzy diatas mempunyai dua buah input yaitu v_{aref} dan v_{bref} dengan tiga output U_a , U_b , U_c .

III.5.1 Fungsi Keanggotaan Dari kontroler Logika Fuzzy

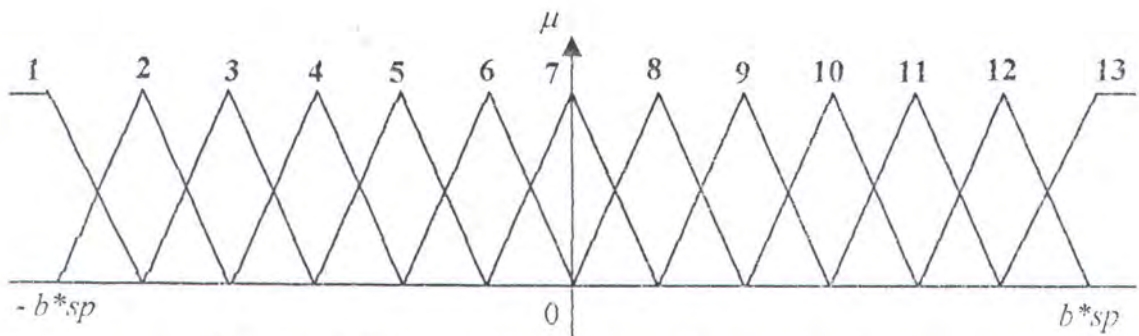
Dalam perancangan inverter pada tugas akhir ini dipergunakan fungsi keanggotaan himpunan fuzzy input dan output yang dinamis sesuai dengan input referensi atau setpoint. Fungsi keanggotaan fuzzy untuk kedua input dibuat sama,

dengan distribusi segitiga simetris sebanyak 7 jenis himpunan fuzzy dengan notasi setiap jenis himpunan fuzzy dengan bilangan 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7. Bentuk fungsi keanggotaan input seperti gambar 3.6 berikut,



Gambar 3.6 Fungsi keanggotaan input $V_{\alpha\text{ref}}$ dan $V_{\beta\text{ref}}$

Fungsi keanggotaan dari ketiga output yaitu U_a , U_b , U_c adalah sama dengan distribusi segitiga simetris sebanyak 13 jenis himpunan fuzzy dengan notasi setiap himpunan fuzzy dengan bilangan 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, seperti pada gambar 3.7 berikut,



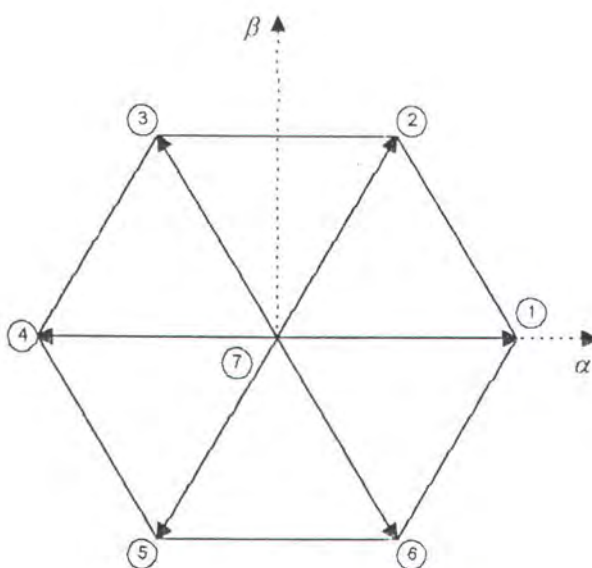
Gambar 3.7 Fungsi Keanggotaan Output U_a , U_b , U_c

Fungsi keanggotaan himpunan fuzzy diatas merupakan fungsi keanggotaan yang simetris dengan nilai maksimumnya ditentukan berdasarkan input referensi atau setpoint. Fungsi keanggotaan input ditentukan oleh faktor pengali a yang merupakan inputan dan setpoint sp yang dibuat sama dengan $i_m = 0.08$, fungsi

keanggotaan output ditentukan oleh faktor pengali b yang merupakan inputan dan setpoint sp yang juga dibuat sama dengan $i_m = 0.08$.

III.5.2 Pembuatan Aturan Dasar (*Rules Base*)

Aturan dasar (*rules base*) merupakan salah inti dari kontroler logika fuzzy, data-data input diolah dengan menggunakan aturan dasar ini untuk menghasilkan output aksi kontrol. Untuk mencapai respon sistem yang baik maka pembuatan aturan dasar harus teliti serta berulang sehingga didapatkan hasil terbaik. Ada beberapa metode pembuatan aturan dasar diantaranya berdasarkan pengalaman atau pengetahuan dari ahli.



Gambar 3.8 Algoritma inverter *space vector*¹⁸

¹⁸ ____, AC Induction Motor Control Using Constant V/Hz Principle and Space Vector PWM Technique with TMS320C240, Texas Instrument 1998. <URL: <http://www.ti.com>>, p. 16

Pada penelitian tugas akhir ini aturan dasar dibuat berdasarkan algoritma *space vector switching inverter*, penggunaan KLF bertujuan untuk menghasilkan output yang lebih halus dari metode inverter sebelumnya. Algoritma dari *space vector inverter* dapat diperlihatkan seperti gambar 3.8 dimana input dari inverter ini adalah tegangan $v_{\alpha ref}$ dan $v_{\beta ref}$ sebagai referensi. Tegangan yang diberikan sesuai dengan posisi dari kedua tegangan input referensi ini seperti pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Tegangan output inverter *space vector*¹⁹

Posisi input	Tegangan ouput		
	Ua	Ub	Uc
1	2/3	-1/3	-1/3
2	1/3	1/3	-2/3
3	-1/3	2/3	-1/3
4	-2/3	1/3	1/3
5	-1/3	-1/3	2/3
6	1/3	-2/3	1/3
7	0	0	0

Dari tabel tersebut tegangan yang diberikan pada motor untuk posisi input referensi yang berbeda mempunyai perbedaan yang besar hal ini dapat mempengaruhi respon dari motor induksi menjadi tidak halus.

Pembuatan aturan dasar dari KLF yang akan diimplementasikan pada pengaturan kecepatan motor induksi didasarkan pada algoritma inverter diatas.

Input referensi dibagi kedalam tujuh himpunan fuzzy, dengan pembagian ini maka

¹⁹ Ibid. p. 15

kita dapat membuat nilai output yang bervariasi berdasarkan besar dari input. Sebagai contoh untuk $v_{\beta ref} = 0$ dan $v_{\alpha ref} \neq 0$ maka tegangan output inverter berdasar tabel diatas untuk $U_a = 2/3$, nilai ini tidak akan berubah untuk berapapun nilai dari $v_{\alpha ref}$ kecuali nilainya nol, dari sini terlihat jelas bahwa tegangan keluaran inverter ini kurang halus. Dengan menggunakan dasar inverter tersebut maka dapat kita susun suatu aturan dasar untuk KLF, dimana untuk $v_{\beta ref} = 0$ maka tegangan output akan berubah sesuai dengan nilai dari $v_{\alpha ref}$.

Untuk keadaan diatas dimana $v_{\beta ref} = 0$ (himpunan fuzzy 4), untuk tegangan $v_{\alpha ref}$ besar (himpunan fuzzy 7) maka tegangan outputnya juga besar atau maksimal sesuai dengan tabel 3.1 diatas yaitu $U_a = 2/3$ (himpunan fuzzy 13). Untuk nilai tegangan $v_{\alpha ref}$ yang lebih kecil maka output tegangan juga kecil, hal ini dapat dinyatakan sebagai berikut :

Jika $v_{\alpha ref} = 7$ dan $v_{\beta ref} = 4$ maka $U_a = 13$

Jika $v_{\alpha ref} = 6$ dan $v_{\beta ref} = 4$ maka $U_a = 12$

Jika $v_{\alpha ref} = 5$ dan $v_{\beta ref} = 4$ maka $U_a = 11$

demikian seterusnya, hal ini juga diterapkan pada tegangan output U_b dan U_c .

Jumlah aturan dasar yang dibuat sebanyak 49 buah, hal ini bertujuan agar aturan dasar dapat mencakup keseluruhan input referensi yang mungkin. Aturan dasar yang digunakan pada pengaturan kecepatan motor induksi ini dinyatakan pada tabel 3.2 untuk tegangan U_a , tabel 3.3 untuk tegangan U_b , dan tabel 3.4 untuk tegangan U_c .

Tabel 3.2 Aturan dasar untuk output Ua

V_{β} V_{α}	1	2	3	4	5	6	7
1	4	5	6	7	8	9	10
2	3	4	5	7	9	10	11
3	2	3	4	7	10	11	12
4	1	2	3	7	11	12	13
5	2	3	4	7	10	11	12
6	3	4	5	7	9	10	11
7	4	5	6	7	8	9	10

Tabel 3.2 Aturan dasar untuk output Ub

V_{β} V_{α}	1	2	3	4	5	6	7
1	7	6	5	4	3	2	1
2	8	7	6	5	4	3	2
3	9	8	7	6	5	4	3
4	10	9	8	7	6	5	4
5	11	10	9	8	7	6	5
6	12	11	10	9	8	7	6
7	13	12	11	10	9	8	7

Tabel 3.2 Aturan dasar untuk output Uc

V_{β} V_{α}	1	2	3	4	5	6	7
1	13	12	11	10	9	8	7
2	12	11	10	9	8	7	6
3	11	10	9	8	7	6	5
4	10	9	8	7	6	5	4
5	9	8	7	6	5	4	3
6	8	7	6	5	4	3	2
7	7	6	5	4	3	2	1

III.5.3 Defuzzifikasi

Proses terakhir dari kontroler logika fuzzy adalah proses defuzzifikasi yaitu pengembalian nilai dari himpunan fuzzy ke variabel output yang *crisp*. Ada beberapa metode yang dapat dipakai pada proses defuzzifikasi ini yaitu MOM dan COA. Dalam simulasi program tugas akhir ini digunakan metode MOM.

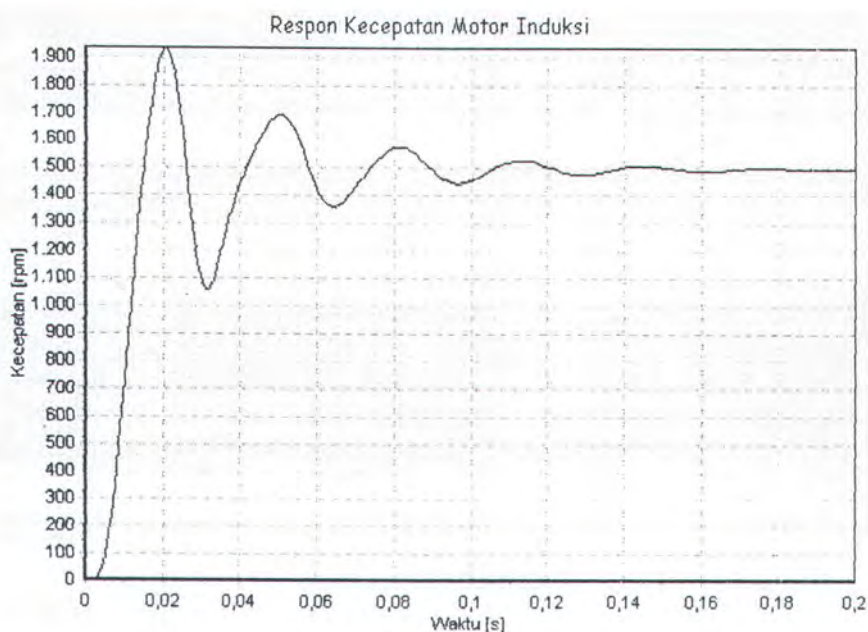
SIMULASI PROGRAM DAN ANALISA



BAB IV

SIMULASI PROGRAM DAN ANALISA

Program simulasi dijalankan dengan beberapa parameter input yaitu parameter motor, konstanta kontroler proporsional integral, konstanta pengali fungsi keanggotaan kontroler logika fuzzy serta *time sampling* dan lama pengamatan. Karakteristik dasar respon *plant* motor yang disimulasikan pada tugas akhir seperti pada gambar 4.1, dengan frekuensi tegangan input 50 Hz, motor memiliki waktu naik (*rise time*) 0.015 detik dengan *overshoot* sekitar 27 % dari setpoint dan *settling time* 0.1 detik, respon motor menjadi tidak stabil pada frekuensi tegangan input diatas 60 Hz. Dari sini terlihat pengaturan kecepatan motor induksi secara open loop terbatas pada kecepatan tertentu dengan respon output yang kurang baik.

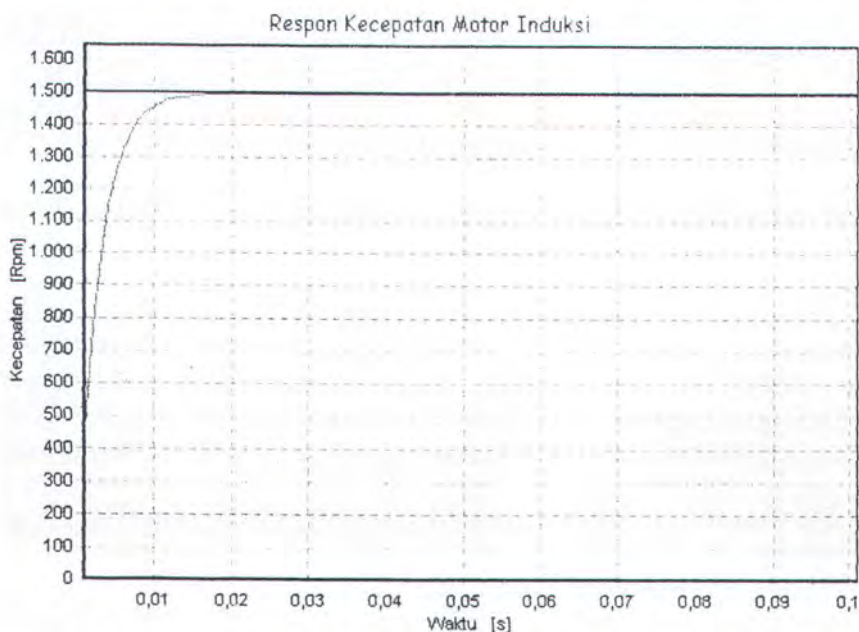


Gambar 4.1 Respon Open loop dengan $f : 50$ Hz

Motor yang digunakan pada simulasi memiliki parameter-parameter tahanan stator (R_s) : 176 Ohm, tahanan rotor (R_r) : 190 Ohm, induktansi stator (L_s) : 3.79 H, induktansi rotor (L_r) : 3.31 H, pasangan kutub (P) : 2, inersia motor (M_j) : 0.0000105, gesekan motor (K_g): 0.0000149.

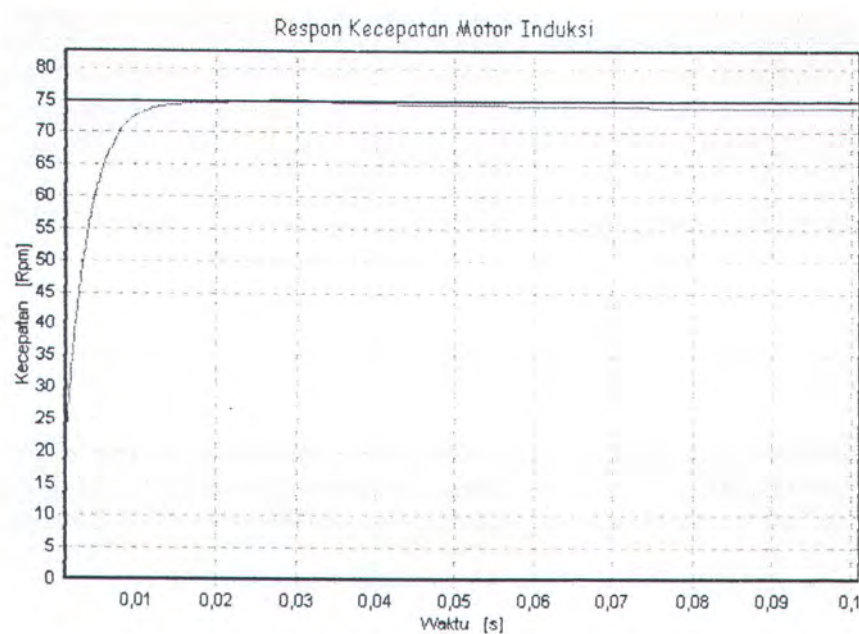
Waktu pengambilan sampel (*time sampling*) pada suatu sistem pengaturan nilainya berada diantara pada dua sampai sepuluh kali waktu naik (*rise time*), dalam simulasi ini waktu pengambilan sampel berdasar waktu naik dari motor adalah 0.001 detik.

Hasil simulasi program dengan parameter motor diatas pada kecepatan 1500 rpm dengan kondisi tanpa beban nilai K_p : 0.00008, K_i : 0.5, faktor pengali fuzzy a : 4, b : 0.3 seperti gambar 4.2, respon motor memiliki waktu naik 0.006 detik, *settling time* 0.008 detik tanpa *overshoot* dengan kesalahan tunak 5 rpm.

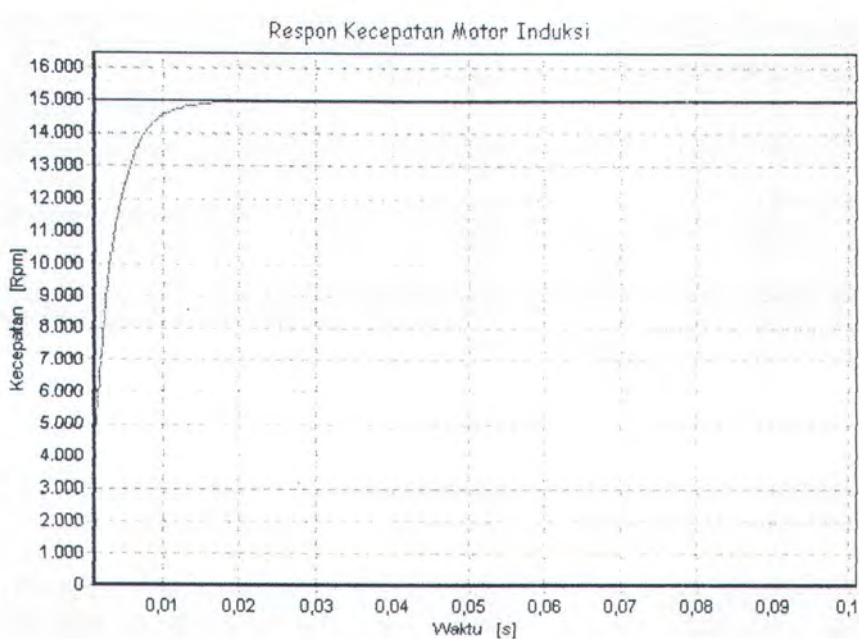


Gambar 4.2 Respon sistem dengan K_p : 0.00008, K_i : 0.5, a : 4, b : 0.3

Respon kecepatan motor yang dihasilkan pada kecepatan rendah seperti gambar 4.3, demikian pula untuk kecepatan tinggi, gambar 4.4, respon yang dihasilkan cepat tanpa adanya *overshoot* dengan kesalahan tunak kecil.

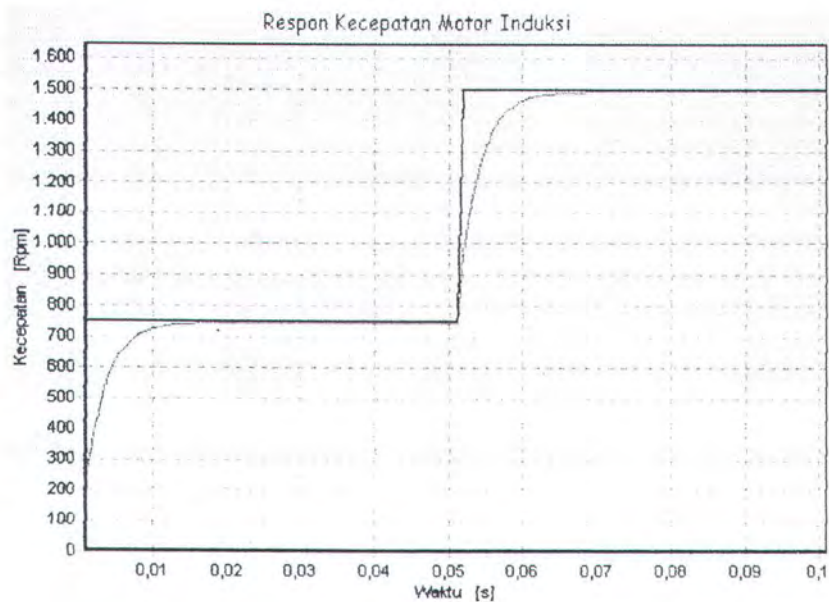


Gambar 4.3 Respon kecepatan motor pada kecepatan rendah

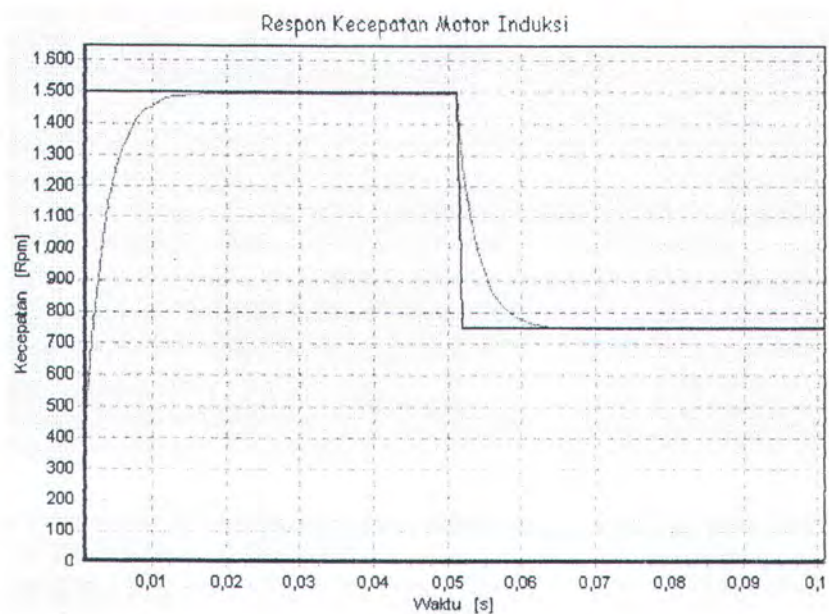


Gambar 4.4 Respon kecepatan motor pada kecepatan tinggi

Pada gambar 4.5 diperlihatkan pengaruh kenaikan kecepatan pada motor, terlihat respon motor secara umum memiliki karakteristik yang tetap. Demikian pula dengan penurunan kecepatan sistem memiliki karakteristik respon yang tetap seperti gambar 4.6.



Gambar 4.5 Pengaruh kenaikan kecepatan motor

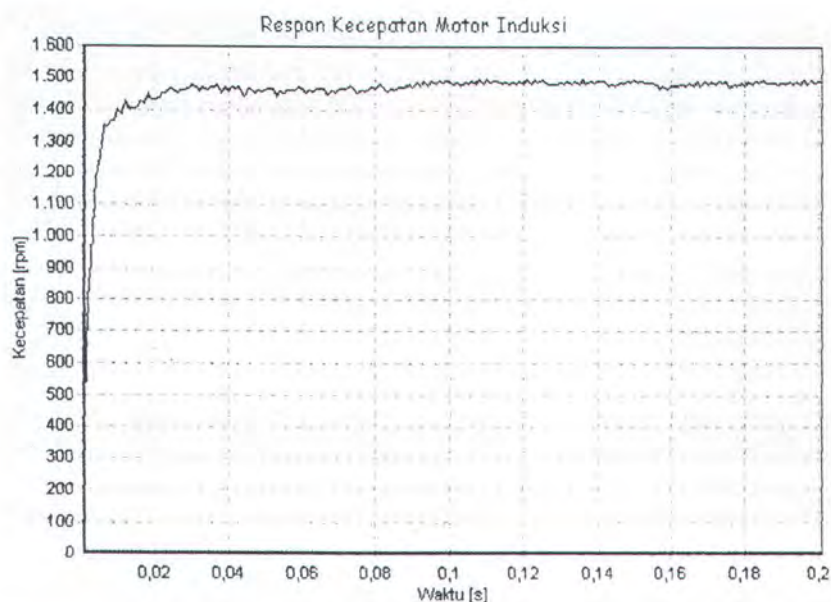


Gambar 4.6 Pengaruh penurunan kecepatan motor

4.1 Perbandingan dengan *Switching Inverter*

Salah satu inverter sederhana yang sering digunakan pada pengaturan kecepatan motor induksi adalah *switching inverter*, tegangan output dari inverter ini hanya tiga macam yaitu satu, nol atau negatif satu. Respon dari *switching inverter* seperti pada gambar 4.7, dengan kecepatan input 1500 rpm dan konstanta kontroler PI, $K_p : 0.00008$, $K_i : 0.5$, sama dengan yang digunakan pada inverter kontroler logika fuzzy dengan respon seperti gambar 4.2.

Respon sistem memiliki waktu naik 0.01 detik dengan *settling time* 0.02 detik dengan kesalahan tunak sekitar 10 rpm. Dari sini terlihat respon sistem yang dihasilkan memiliki performansi yang kurang baik bila dibandingkan dengan inverter menggunakan kontroler logika fuzzy, respon lebih lambat serta tidak halus dengan kesalahan tunak yang besar.



Gambar 4.7 Respon sistem dengan *switching inverter*

4.2 Simulasi dengan Perubahan Nilai Kontroler Proporsional Integral

Pada bagian ini simulasi dilakukan dengan perubahan kombinasi nilai konstanta proporsional K_p dan konstanta integral K_i . Secara lengkap hasil simulasi seperti pada tabel 4.1, dengan kecepatan input 1500 rpm faktor pengali fungsi keanggotan fuzzy $a : 4$ dan $b : 0.3$.

Tabel 4.1 Karakteristik respon untuk perubahan kontroler PI,
Kecepatan input : 1500 rpm

Kontroler PI		Tr [s]	Ts [s]	Ess [rpm]	Keterangan
Kp	Ki				
0.00008	0.1	0.038	0.055	31.765	-
0.00008	0.5	0.006	0.008	5.976	-
0.00008	1	0.002	0.003	3.059	-
0.00008	2	0.001	0.001	1.480	Overshoot
0.08	0.5	0.006	0.008	5.972	-
0.5	0.5	0.007	0.010	5.956	-
1	0.5	0.01	0.012	5.949	Osilasi

Secara umum semakin besar konstanta integral K_i karakteristik respon semakin baik dimana waktu naik dan *settling time* semakin cepat serta kesalahan tunak E_{ss} semakin kecil, tetapi bila K_i diperbesar terjadi *overshoot*. Perubahan nilai K_p berpengaruh pada kecepatan respon sistem dimana semakin besar K_p respon semakin lambat dan bila diperbesar menimbulkan osilasi, sedangkan nilai kesalahan tunak tidak mengalami perubahan. Respon terbaik didapatkan pada nilai $K_p : 0.00008$ dan $K_i : 1$.

Tabel 4.2 merupakan hasil simulasi dengan kecepatan input 750 rpm, semakin besar nilai K_i respon semakin cepat dan kesalahan tunak semakin kecil, tetapi timbul *overshoot* bila nilai K_i diperbesar. Perubahan nilai K_p berpengaruh pada kecepatan respon sistem dimana semakin besar K_p respon semakin lambat

dan bila diperbesar menimbulkan osilasi, sedangkan nilai kesalahan tunak tidak mengalami perubahan. Respon terbaik didapatkan pada nilai K_p : 0.00008 dan K_i : 1.

Tabel 4.2 Karakteristik respon untuk perubahan kontroler PI,
Kecepatan input : 750 rpm

Kontroler PI		Tr [s]	Ts [s]	Ess [rpm]	Keterangan
Kp	Ki				
0.00008	0.1	0.038	0.058	23.921	-
0.00008	0.5	0.006	0.008	4.681	-
0.00008	1	0.002	0.003	2.289	-
0.00008	2	0.001	0.001	1.001	Overshoot
0.08	0.5	0.006	0.008	4.677	-
0.5	0.5	0.007	0.01	4.666	-
1	0.5	0.01	0.012	4.691	Osilasi

Tabel 4.3 merupakan hasil simulasi dengan kecepatan input 3000 rpm, semakin besar nilai K_i respon semakin cepat dan kesalahan tunak semakin kecil, tetapi timbul *overshoot* bila nilai K_i diperbesar. Perubahan nilai K_p berpengaruh pada kecepatan respon sistem dimana semakin besar K_p respon semakin lambat dan bila diperbesar menimbulkan osilasi, sedangkan nilai kesalahan tunak tidak mengalami perubahan. Respon terbaik didapatkan pada nilai K_p : 0.00008 dan K_i : 1.

Tabel 4.3 Karakteristik respon untuk perubahan kontroler PI,
Kecepatan input : 3000 rpm

Kontroler PI		Tr [s]	Ts [s]	Ess [rpm]	Keterangan
Kp	Ki				
0.00008	0.1	0.037	0.053	54.638	-
0.00008	0.5	0.006	0.008	10.049	-
0.00008	1	0.002	0.003	5.075	-
0.00008	2	0.001	0.001	2.526	Overshoot
0.08	0.5	0.006	0.008	10.049	-
0.5	0.5	0.007	0.010	10.046	-
1	0.5	0.01	0.012	10.036	Osilasi



4.3 Simulasi dengan Perubahan Nilai Pengali Fungsi Keanggotaan Fuzzy

Pada bagian ini simulasi dilakukan dengan perubahan kombinasi nilai faktor pengali fungsi keanggotaan fuzzy *a* dan *b*. Secara lengkap hasil simulasi seperti pada tabel 4.4, dengan kecepatan input 1500 rpm nilai konstanta proporsional *Kp* : 0.00008 dan *Ki* : 0.5.

Tabel 4.4 Karakteristik respon untuk perubahan faktor pengali fuzzy, Kecepatan input : 1500 rpm

Faktor Pengali		Tr [s]	Ts [s]	Ess [rpm]	Keterangan
<i>a</i>	<i>b</i>				
4	0.1	0.006	0.008	4.822	-
4	0.3	0.006	0.008	5.976	-
4	1	0.006	0.008	19.693	-
4	5	0.026	0.035	60.814	Osilasi
0.5	0.3	0.006	0.008	6.004	-
1	0.3	0.006	0.008	5.975	-
8	0.3	0.006	0.008	6.054	-

Perubahan nilai *b* berpengaruh pada nilai kesalahan tunak dimana semakin kecil nilai *b* kesalahan tunak semakin kecil, kesalahan tunak tidak mengalami penurunan berarti pada nilai *b* dibawah 0.1. Osilasi pada respon diatas terjadi pada nilai *b* yang besar. Perubahan nilai *a* tidak begitu mempengaruhi respon sistem, perubahan kecil terjadi pada kesalahan tunak. Respon terbaik didapatkan pada nilai *a* : 4 dan *b* : 0.1.

Tabel 4.5 dan tabel 4.6 merupakan simulasi pada kecepatan 750 rpm dan 3000 rpm. Karakteristik respon output tidak berbeda dengan simulasi pada kecepatan 1500 rpm, perubahan faktor pengali fungsi keanggotaan fuzzy *b* berpengaruh pada kesalahan tunak dimana semakin kecil *b* kesalahan tunak semakin kecil, kesalahan tunak tidak mengalami penurunan berarti pada nilai *b*

dibawah 0.1. Perubahan nilai a tidak begitu mempengaruhi respon sistem, perubahan kecil terjadi pada kesalahan tunak. Respon terbaik didapatkan pada nilai $a : 4$ dan $b : 0.1$.

Tabel 4.5 Karakteristik respon untuk perubahan faktor pengali fuzzy, Kecepatan input : 750 rpm

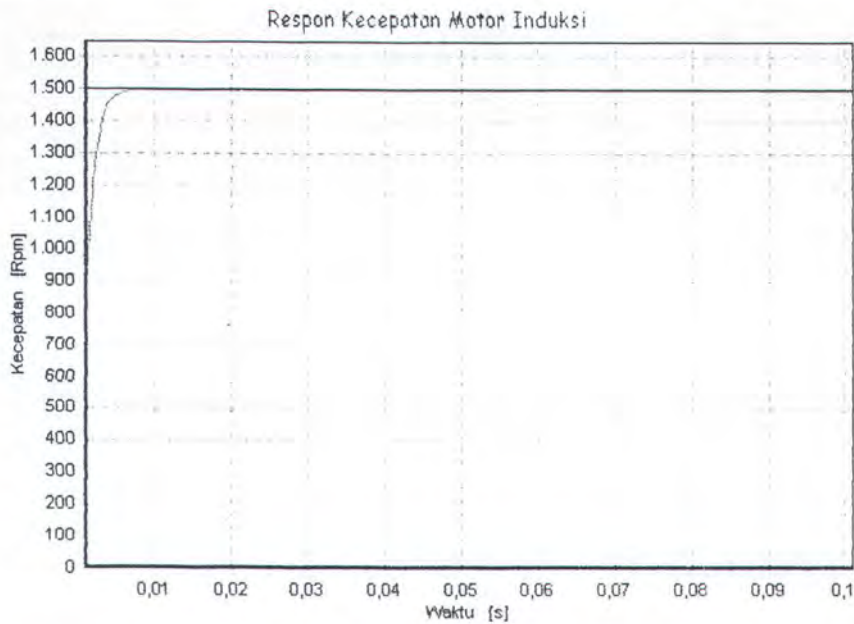
Faktor Pengali		Tr [s]	Ts [s]	Ess [rpm]	Keterangan
a	b				
4	0.1	0.006	0.008	2.597	-
4	0.3	0.006	0.008	4.681	-
4	1	0.006	0.008	28.791	Osilasi
4	5	0.01	0.5	101.348	Osilasi
0.5	0.3	0.006	0.008	4.645	-
1	0.3	0.006	0.008	4.677	-
8	0.3	0.006	0.008	4.757	-

Tabel 4.6 Karakteristik respon untuk perubahan faktor pengali fuzzy, Kecepatan input : 3000 rpm

Faktor Pengali		Tr [s]	Ts [s]	Ess [rpm]	Keterangan
a	b				
4	0.1	0.006	0.008	9.417	-
4	0.3	0.006	0.008	10.049	-
4	1	0.006	0.008	17.657	-
4	5	0.006	0.026	107.950	Osilasi
0.5	0.3	0.006	0.008	10.055	-
1	0.3	0.006	0.008	10.046	-
8	0.3	0.006	0.008	10.038	-

Dari tabel-tabel respon kecepatan motor diatas menunjukkan masih adanya kesalahan tunak untuk berbagai kombinasi nilai parameter kontroler, perbaikan yang dilakukan dengan memperbesar nilai K_i belum dapat menghilangkan kesalahan tunak dan bila terlalu besar menimbulkan *overshoot*. Kombinasi perubahan nilai parameter konstanta kontroler proporsional integral dan faktor pengali fungsi keanggotaan fuzzy seperti diatas menghasilkan kombinasi nilai

dengan respon output terbaik pada nilai $K_p : 0.00008$, $K_i : 1$, $a : 4$ dan $b : 0.1$, sistem pada nilai parameter ini memiliki respon kecepatan yang cepat tanpa terjadi *overshoot* dengan waktu naik 0.002 , *settling time* 0.003 dan kesalahan tunak sekitar 2 rpm pada kecepatan input 1500 rpm seperti terlihat pada gambar 4.5.



Gambar 4.8 Respon terbaik sistem dengan $K_p : 0.00008$, $K_i : 1$, $a : 4$, $b : 0.1$

Gambar respon kecepatan motor induksi dengan beberapa perubahan parameter kontroler baik kontroler proporsional integral maupun perubahan faktor pengali fungsi keanggotaan fuzzy secara lengkap dapat dilihat pada lampiran.

PENUTUP



BAB V

PENUTUP

V.1 Kesimpulan

Pemakaian inverter menggunakan kontroler logika fuzzy pada pengaturan kecepatan motor induksi tiga fase metode *vector control* dapat memperbaiki respon output motor. Respon dasar open loop motor induksi tiga fase dengan *overshoot* besar serta berosilasi diperbaiki menjadi respon yang cepat tanpa *overshoot* atau osilasi. Pengaturan kecepatan motor induksi dengan metode ini juga lebih besar, kecepatan dapat diatur mulai kecepatan rendah 75 rpm sampai 15000 rpm dengan respon yang tetap baik.

Penggunaan kontroler logika fuzzy pada inverter motor induksi dapat memperbaiki respon yang dihasilkan oleh *switching inverter*, respon yang dihasilkan lebih cepat serta lebih halus dengan kesalahan tunak lebih kecil.

Perubahan nilai parameter konstanta kontroler PI dapat dilakukan untuk memperbaiki respon kecepatan motor induksi. Nilai konstanta K_i mempengaruhi kecepatan respon sistem serta kesalahan tunak, penambahan nilai K_i dapat mempercepat respon sistem dan memperkecil kesalahan tunak, tetapi bila nilai K_i diperbesar dapat menimbulkan osilasi. Konstanta K_p mempengaruhi kecepatan respon dimana semakin besar nilai K_p respon menjadi lambat dan berosilasi.

Perubahan nilai faktor pengali fungsi keanggotaan fuzzy a dan b hanya mempengaruhi kesalahan tunak respon sistem, semakin kecil nilai b kesalahan tunak semakin kecil dan pada nilai b yang besar sistem berosilasi, kesalahan tunak

tidak mengalami perubahan berarti pada perubahan nilai a . Respon kecepatan motor terbaik dicapai pada nilai parameter kontroler proporsional integral $K_p : 0.00008$, $K_i : 1$ sedangkan nilai pengali fuzzy $a : 4$ dan $b : 0.1$.

V.2 Saran-saran

Pengembangan lebih lanjut dapat dilakukan dari metode pada tugas akhir ini, pemilihan nilai konstanta kontroler PI serta nilai pengali fungsi keanggotaan fuzzy a dan b dapat dilakukan secara adaptif dan mandiri, penelitian juga dapat dilakukan dengan adanya perubahan beban motor. Metode pada tugas akhir ini dapat diimplementasikan secara langsung pada motor, sehingga dapat dibuat peralatan pengendali kecepatan motor induksi. Metode pada tugas akhir ini memerlukan informasi posisi dan kecepatan motor sehingga memerlukan suatu sensor, penelitian juga dapat dilakukan untuk mengestimasi posisi dan kecepatan motor sehingga tidak diperlukan lagi sensor pada peralatan yang dibuat.

DAFTAR PUSTAKA



DAFTAR PUSTAKA

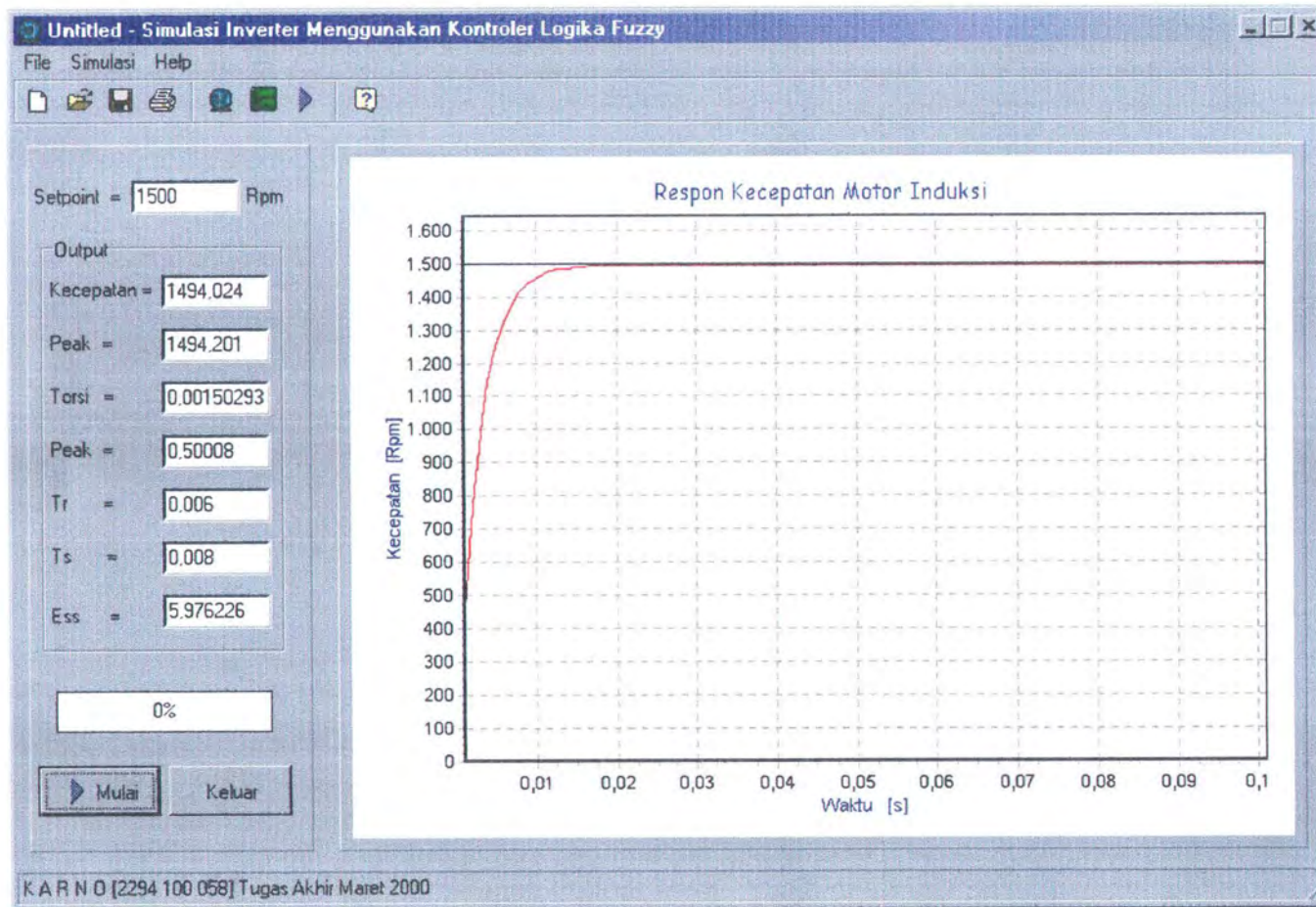
- [1] Ion Boldea, Syed A Nasar, *Vector Control of AC Drives*, CRC Press Inc., 1992.
- [2] Jun Yan, Michael Ryan, James Power , *Using Fuzzy Logic*, Prentice Hall International, British, 1994.
- [3] Katsuhiko Ogata, *Discrete Time Control System*, Prentice Hall, 1987.
- [4] Minghua Fu, Longya Xu, *A Sensorless Direct Torque Control Technique for Permanent Magnet Synchronous Motors*, Ohio State University, 1997.
- [5] Moynihan J.F., Kettle P., Murray A, *High Performance Control of AC Servomotors Using an Integrated DSP*, Motion Control Group, Analog Devices, May 1998. <URL: <http://www.analog.com>>
- [6] Muhammad Harunur Rashid, *Power Electronics Circuit Devices and Application*, Prentice Hall International, New Jersey, 1988.
- [7] Thomas G Habetler, Fransesco Profumo, Michele Pastorelli, Leon M Tolbert, *Direct Torque Control of Induction Machine Using Space Vector Modulation*, IEEE Transactions on Industry Application, vol. 28 no. 5 1992.
- [8] _____, *Field Oriented Control of 3-Phase AC-Motors*, Texas Instruments Europe, February 1998. <URL: <http://www.ti.com>>
- [9] _____, *AC Induction Motor Control Using Constant V/Hz Principle and Space Vector PWM Technique with TMS320C240*, Texas Instrument 1998. <URL: <http://www.ti.com>>
- [10] _____, *Vector Control of AC Induction Motors Using the ADMC331*, Applied Microelectronics Inc. 1998. <URL: <http://www.amirix.com>>
- [11] _____, *Implementing Space Vector Modulation with the ADMC300*, Analog Device, 1999. <URL: <http://www.amirix.com>>

LAMPIRAN



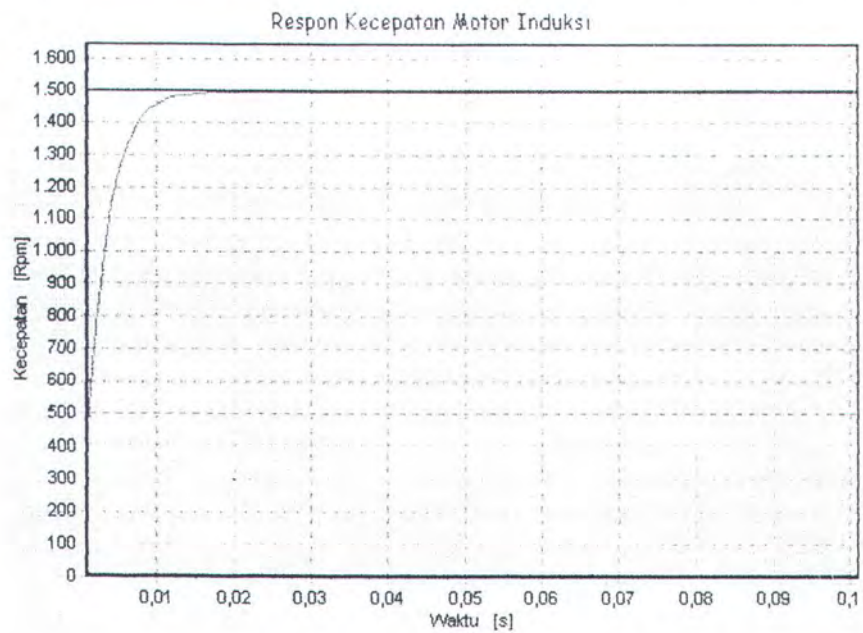
LAMPIRAN

Tampilan Program Simulasi

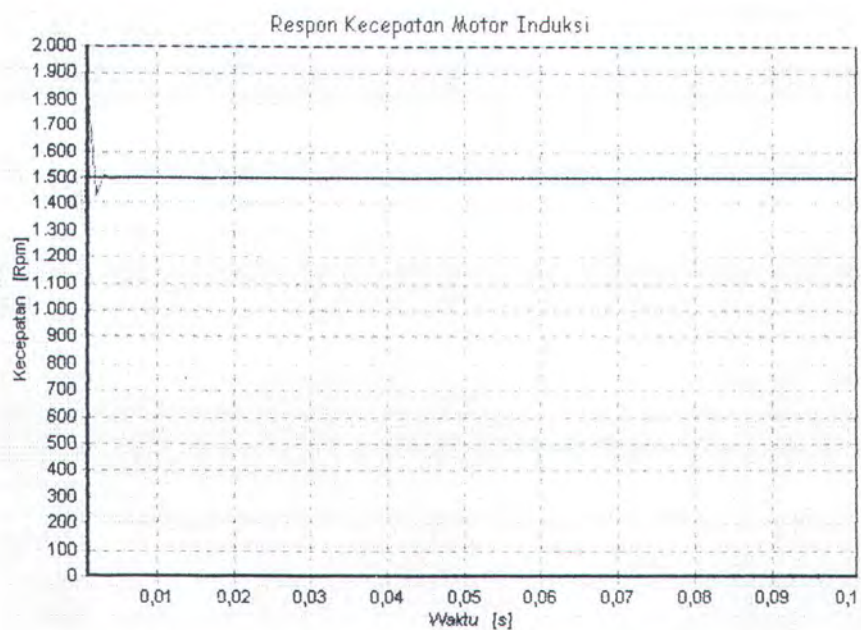


LAMPIRAN

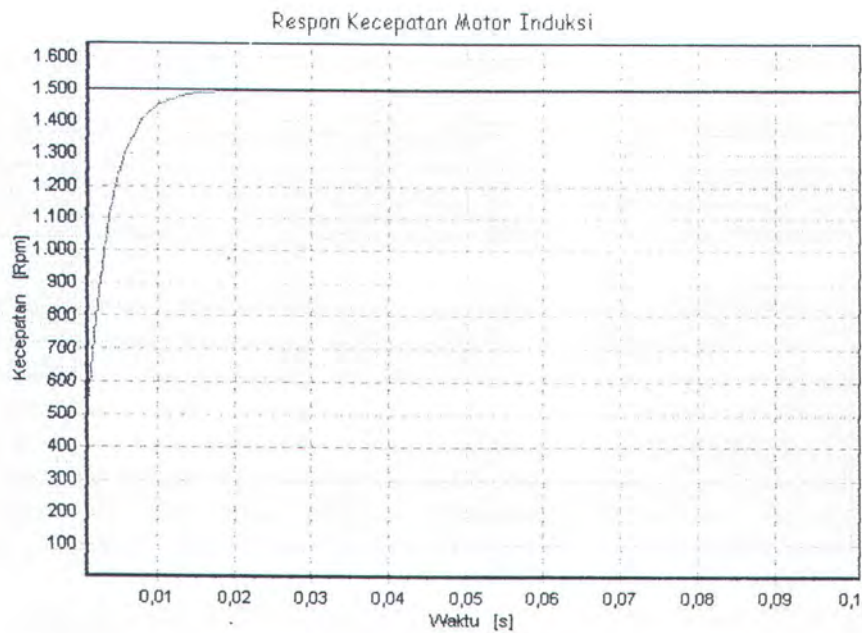
A. Respon sistem dengan perubahan K_p , K_i pada kecepatan input 1500 rpm



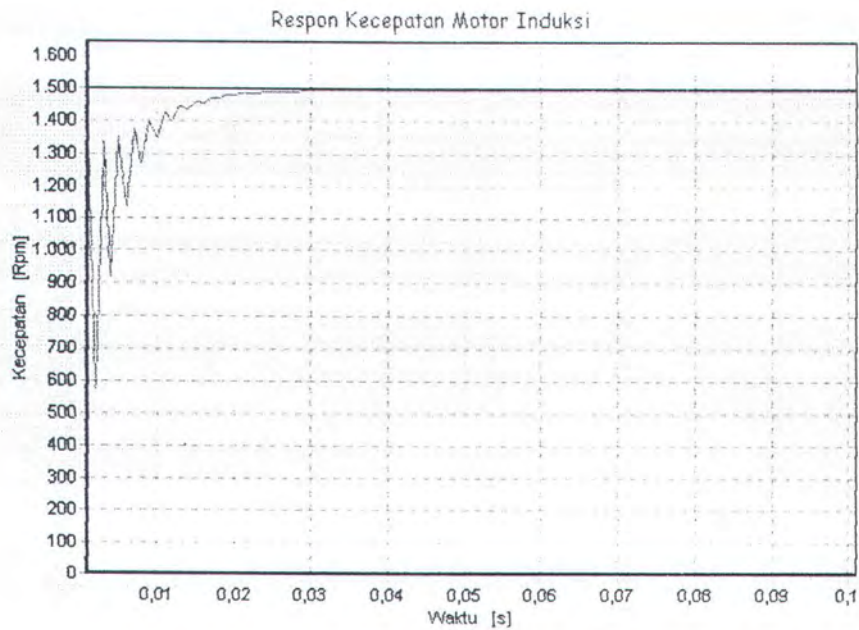
Respon sistem dengan $K_p : 0.00008$ $K_i : 0.5$ $a : 4$ $b : 0.3$



Respon sistem dengan $K_p : 0.00008$ $K_i : 2$ $a : 4$ $b : 0.3$

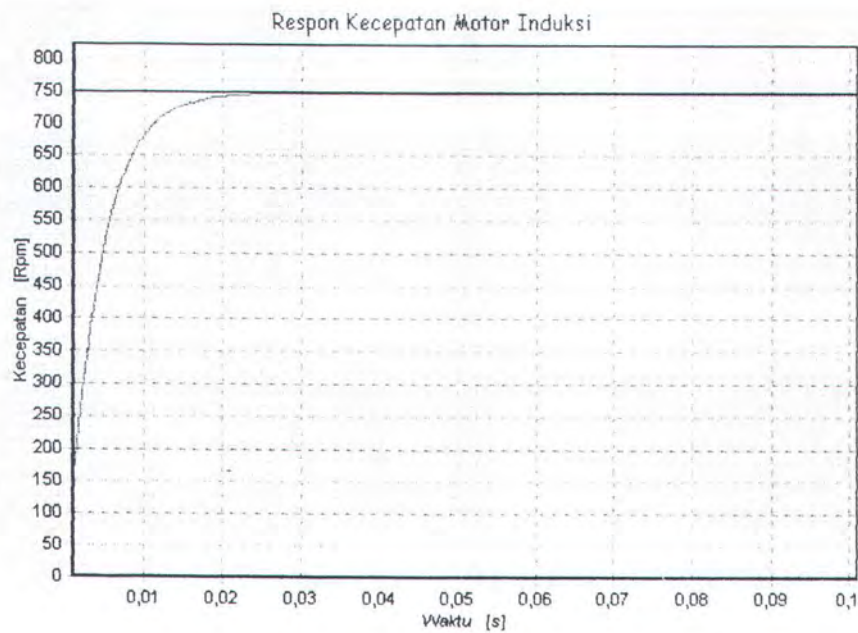


Respon sistem dengan $K_p : 0.08$ $K_i : 0.5$ $a : 4$ $b : 0.3$

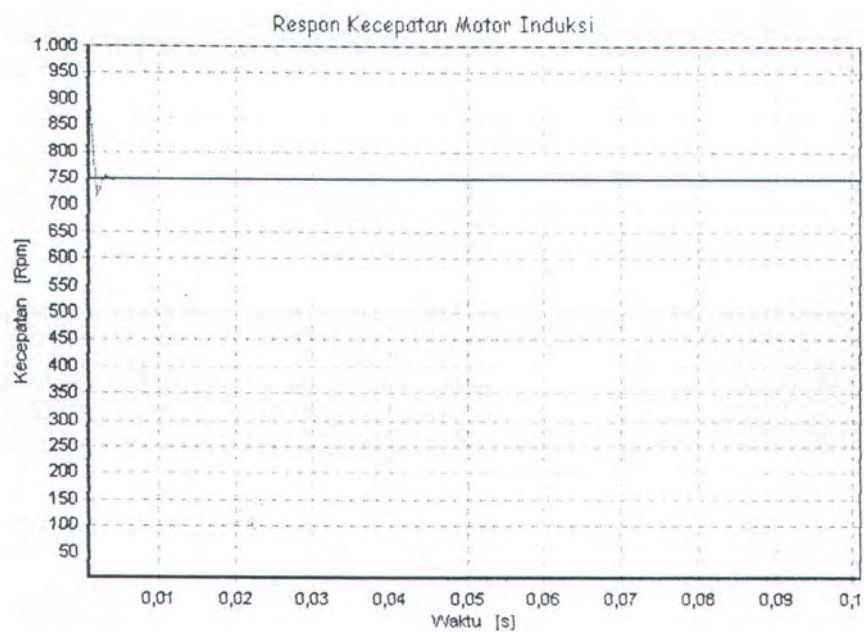


Respon sistem dengan $K_p : 1$ $K_i : 0.5$ $a : 4$ $b : 0.3$

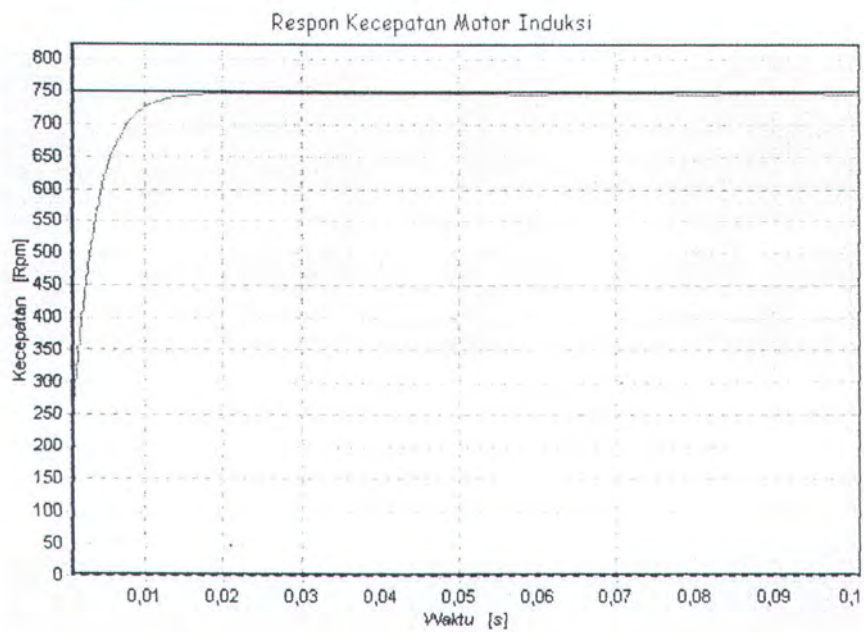
B. Respon sistem dengan perubahan K_p , K_i pada kecepatan input 750 rpm



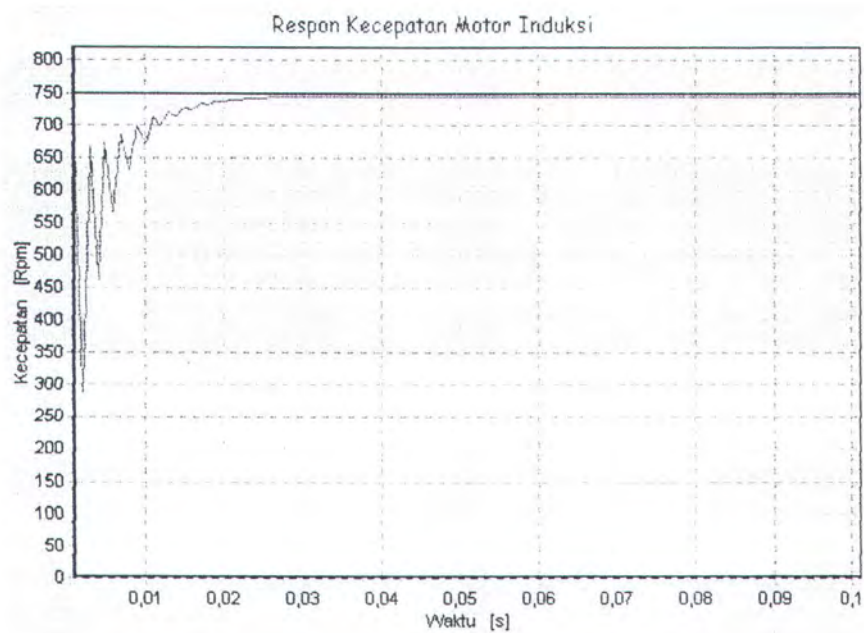
Respon sistem dengan $K_p : 0.00008$ $K_i : 0.5$ $a : 4$ $b : 0.3$



Respon sistem dengan $K_p : 0.00008$ $K_i : 2$ $a : 4$ $b : 0.3$

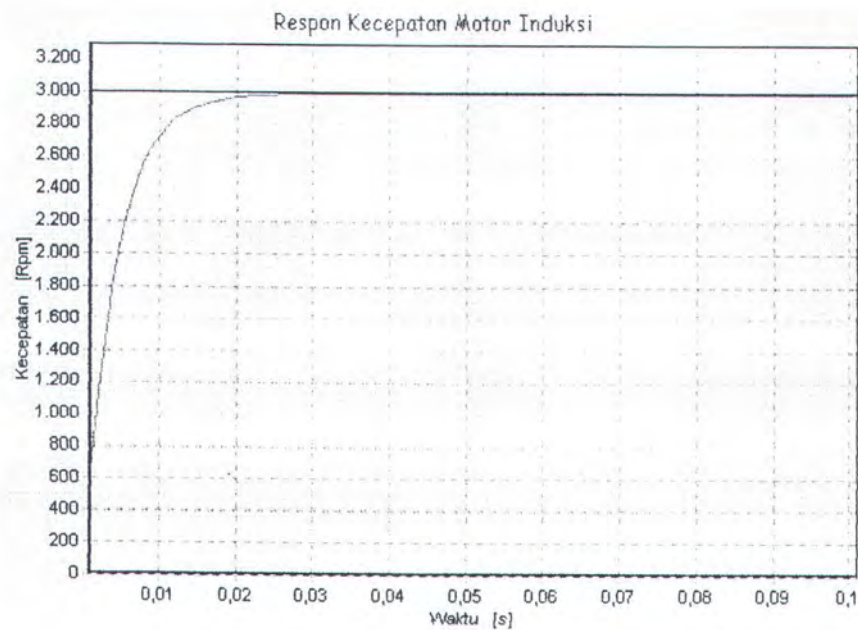


Respon sistem dengan $K_p : 0.08$ $K_i : 0.5$ $a : 4$ $b : 0.3$

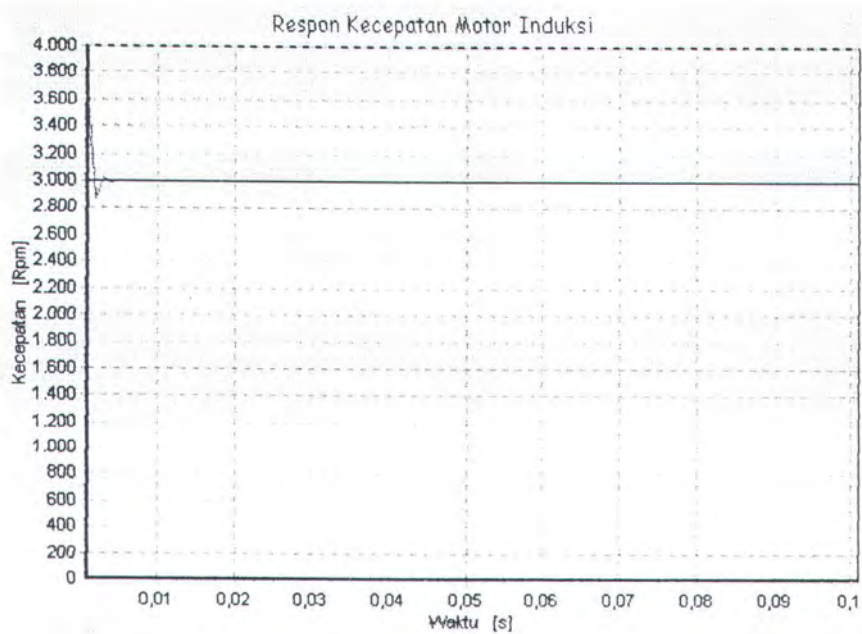


Respon sistem dengan $K_p : 1$ $K_i : 0.5$ $a : 4$ $b : 0.3$

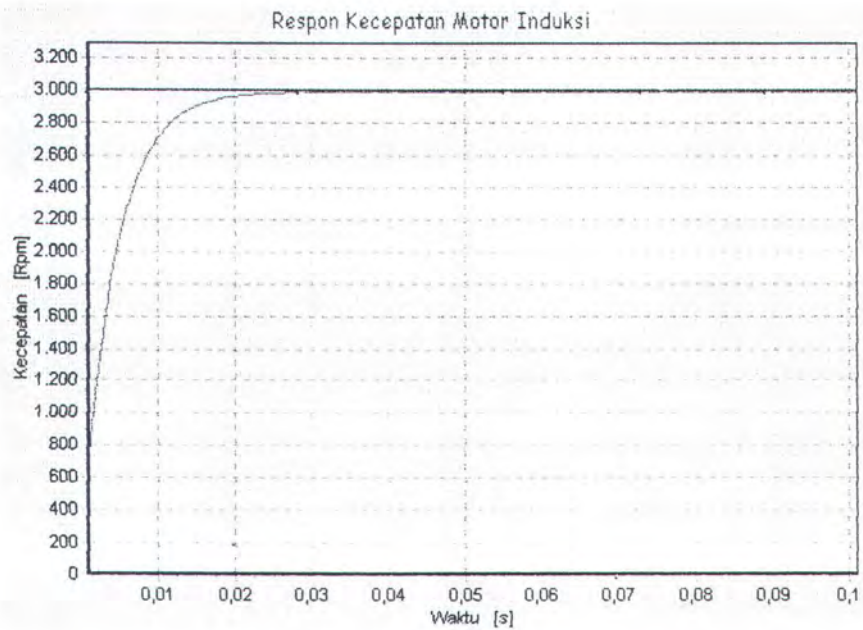
C. Respon sistem dengan perubahan Kp, Ki pada kecepatan input 3000 rpm



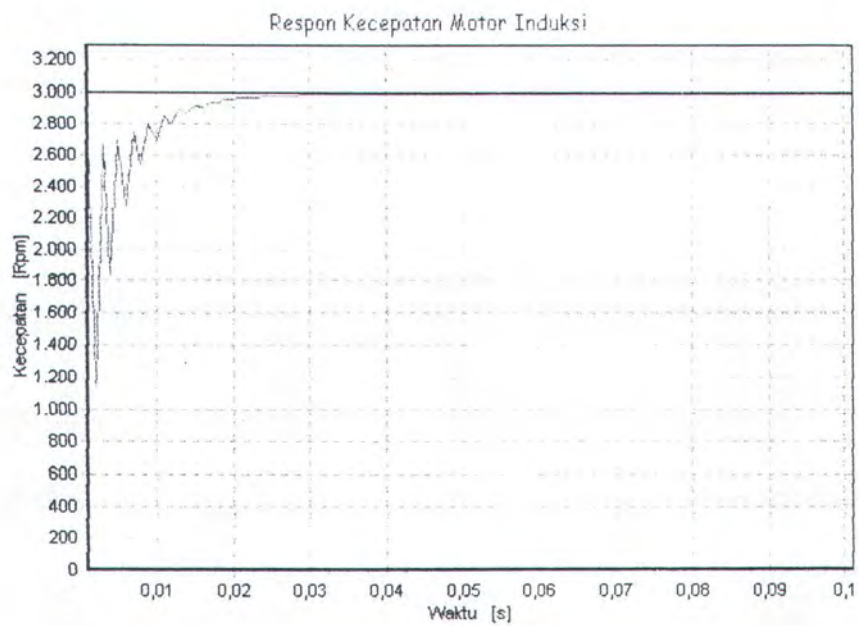
Respon sistem dengan Kp : 0.00008 Ki : 0.5 a : 4 b : 0.3



Respon sistem dengan Kp : 0.00008 Ki : 2 a : 4 b : 0.3

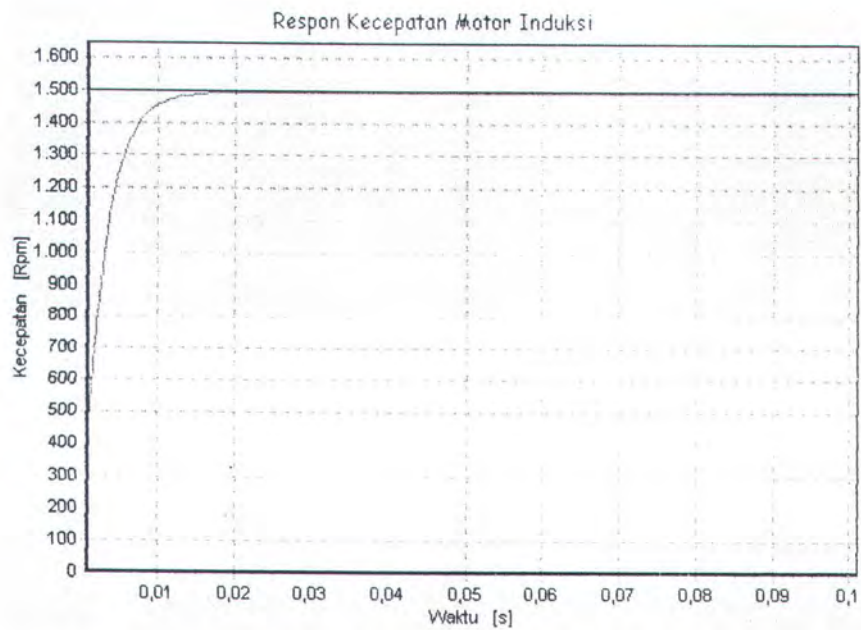


Respon sistem dengan $K_p : 0.08$ $K_i : 0.5$ $a : 4$ $b : 0.3$

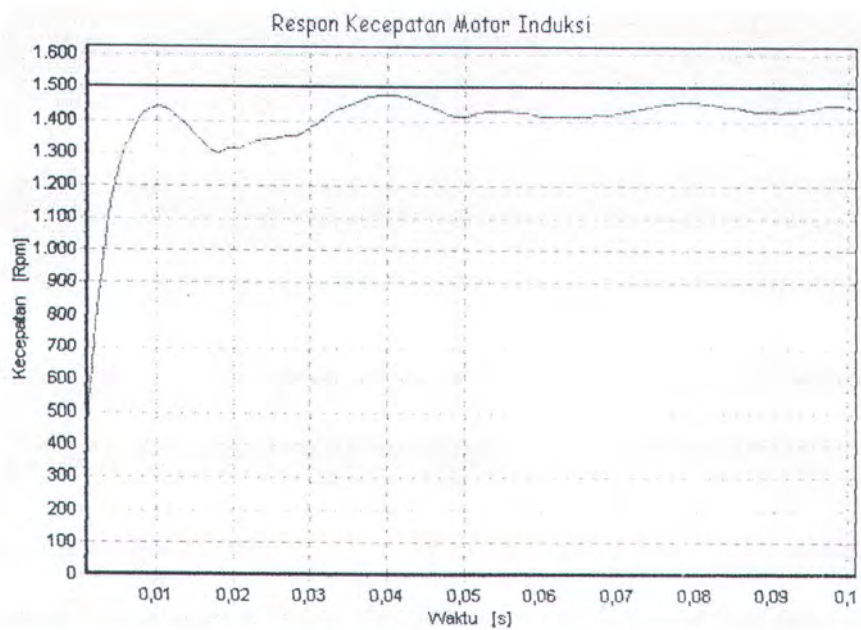


Respon sistem dengan $K_p : 1$ $K_i : 0.5$ $a : 4$ $b : 0.3$

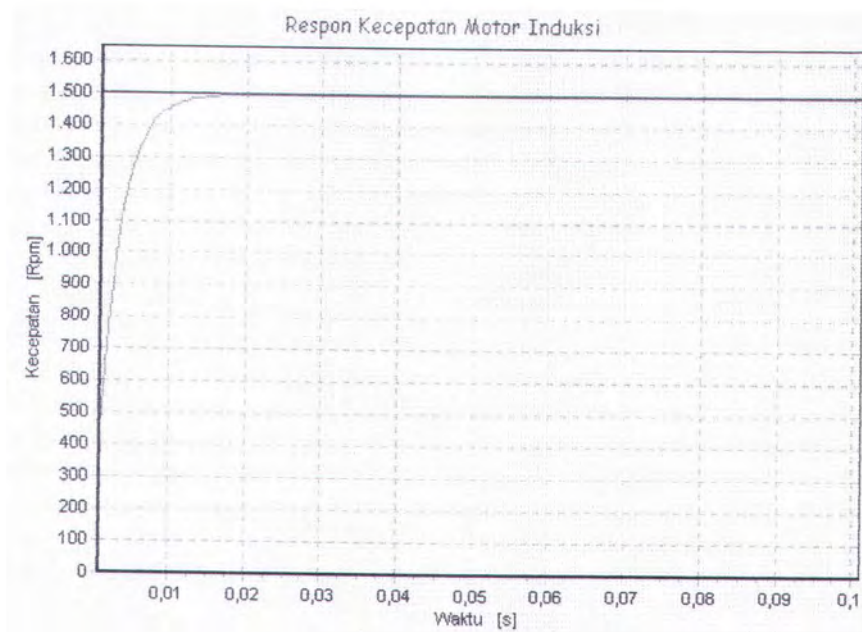
D. Respon sistem dengan perubahan a, b pada kecepatan input 1500 rpm



Respon sistem dengan $K_p : 0.00008$ $K_i : 0.5$ $a : 4$ $b : 0.1$

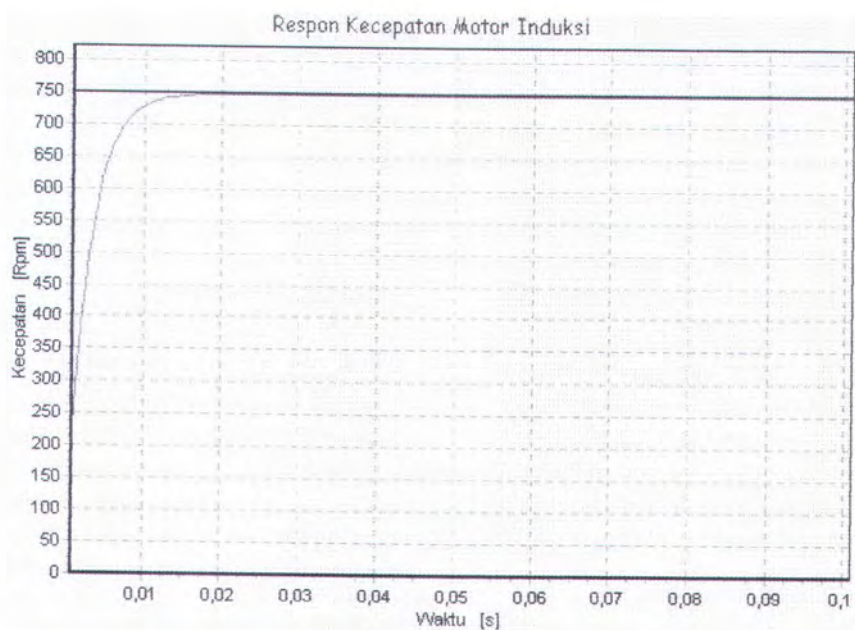


Respon sistem dengan $K_p : 0.00008$ $K_i : 0.5$ $a : 4$ $b : 5$

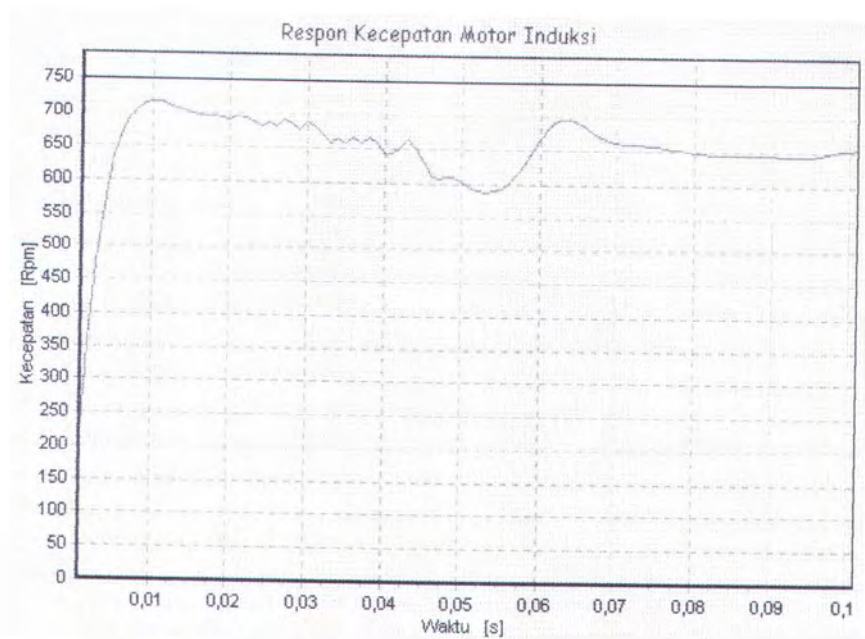


Respon sistem dengan $K_p : 0.00008$ $K_i : 8$ $a : 1$ $b : 0.3$

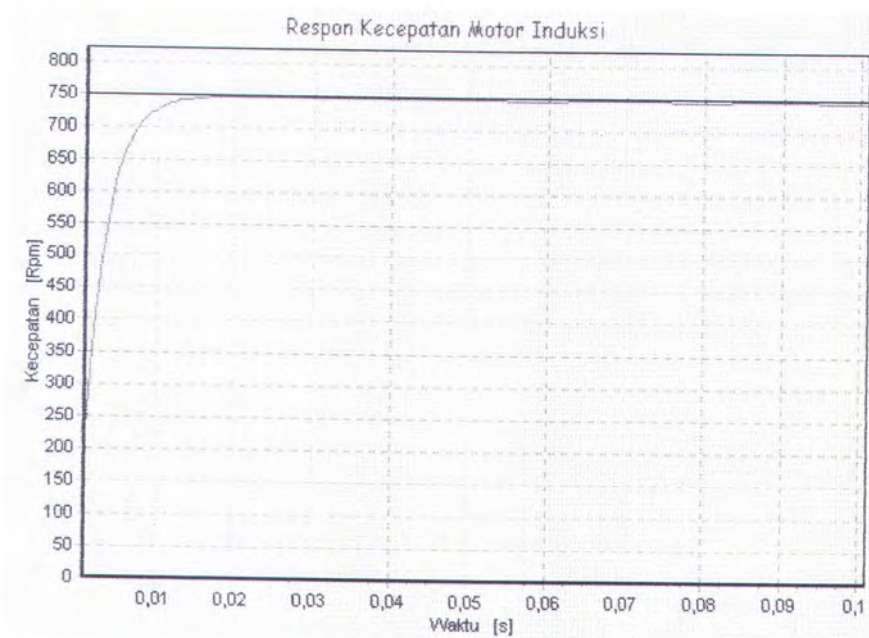
E. Respon sistem dengan perubahan a, b pada kecepatan input 750 rpm



Respon sistem dengan $K_p : 0.00008$ $K_i : 0.5$ $a : 4$ $b : 0.1$

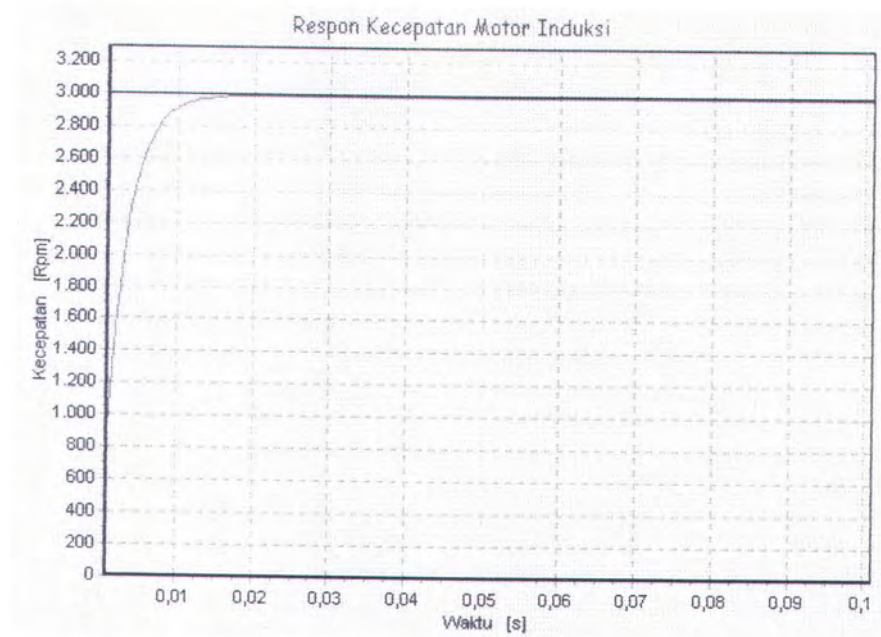


Respon sistem dengan $K_p : 0.00008$ $K_i : 0.5$ $a : 4$ $b : 5$

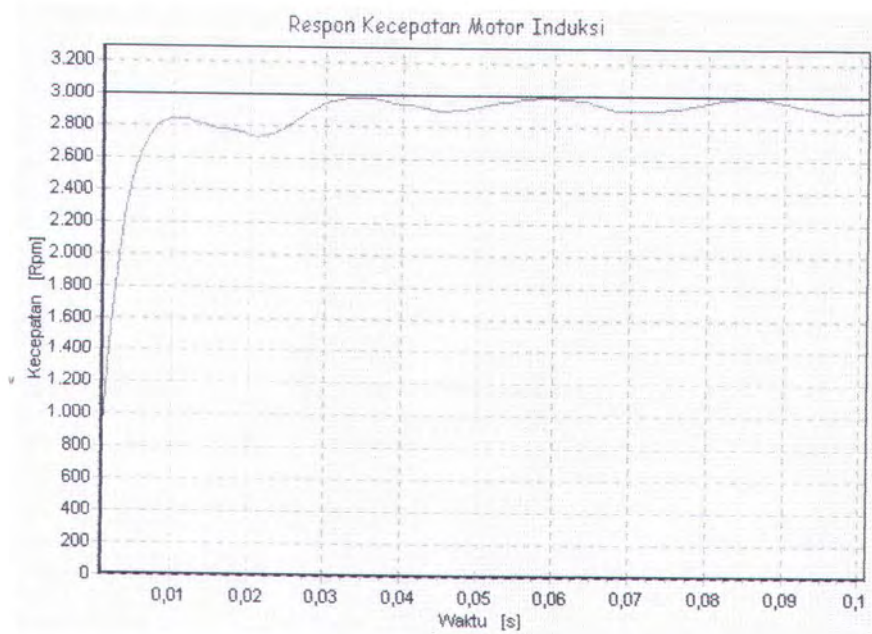


Respon sistem dengan $K_p : 0.00008$ $K_i : 8$ $a : 1$ $b : 0.3$

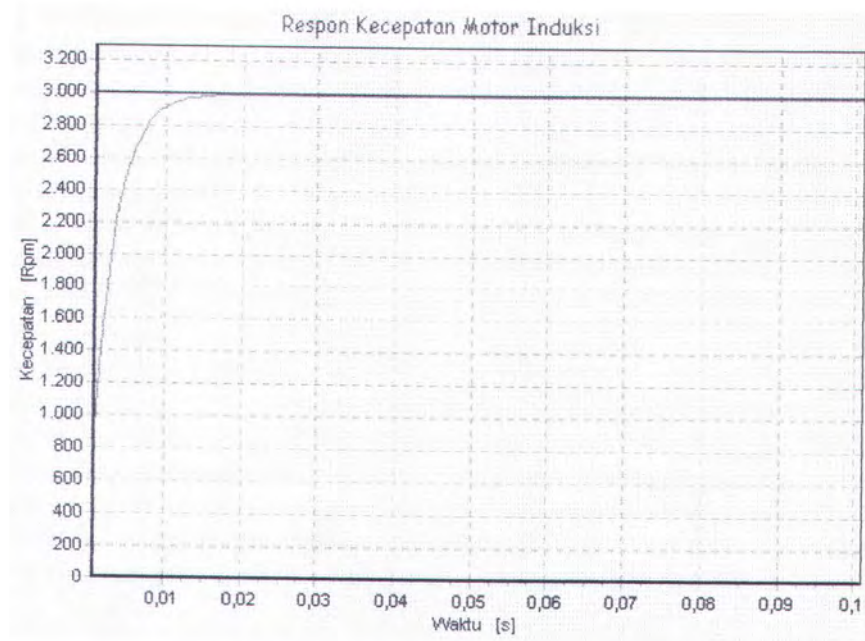
F. Respon sistem dengan perubahan a, b pada kecepatan input 3000 rpm



Respon sistem dengan $K_p : 0.00008$ $K_i : 0.5$ $a : 4$ $b : 0.1$



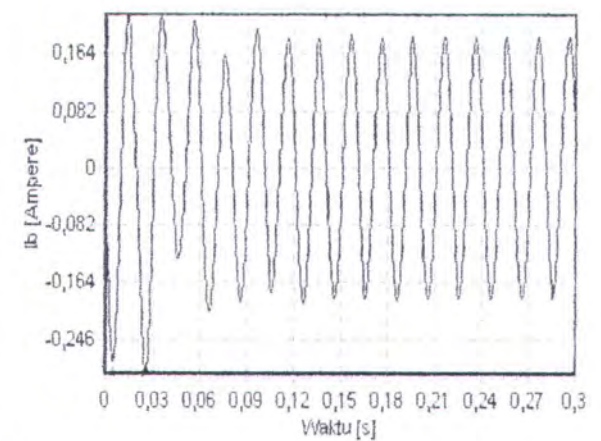
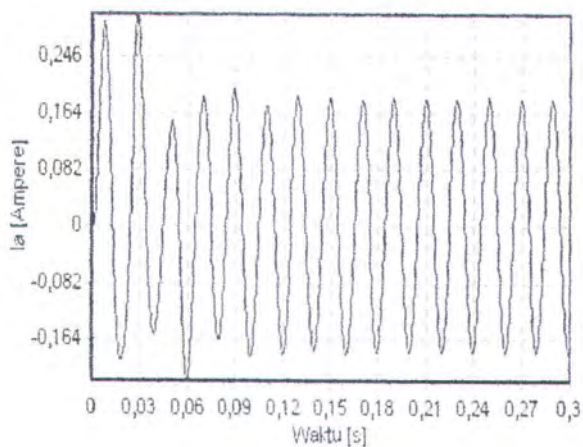
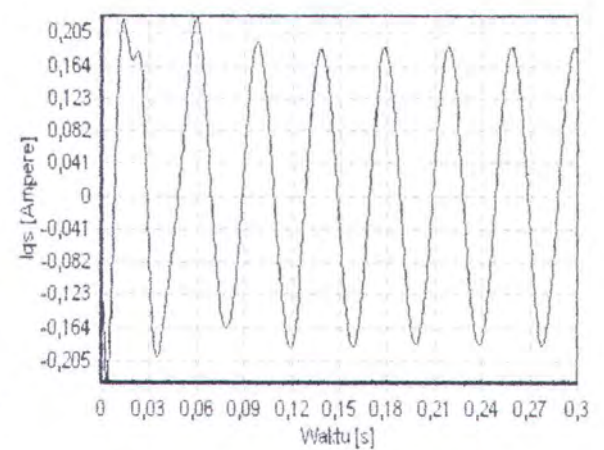
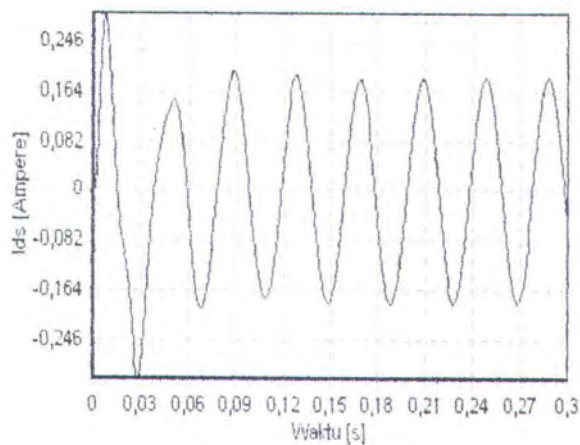
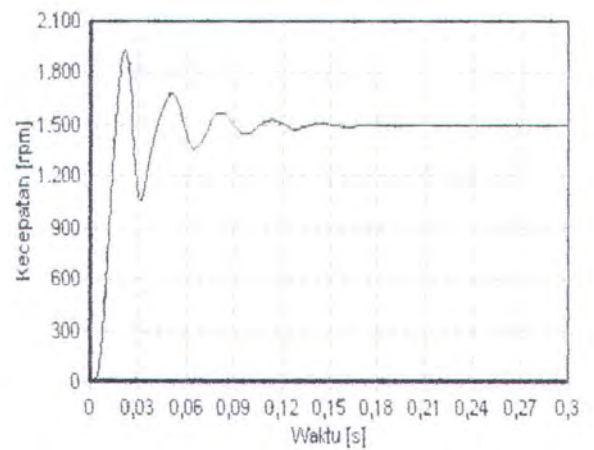
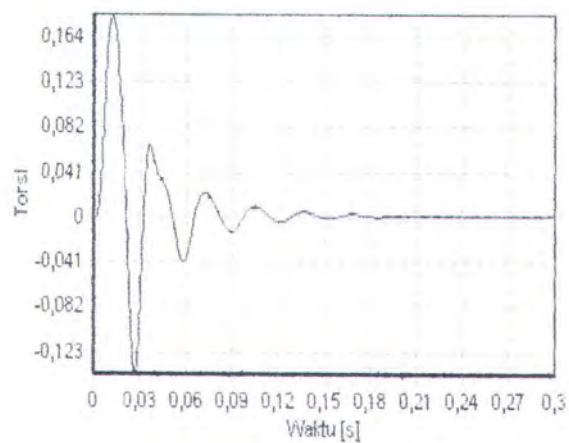
Respon sistem dengan $K_p : 0.00008$ $K_i : 0.5$ $a : 4$ $b : 5$

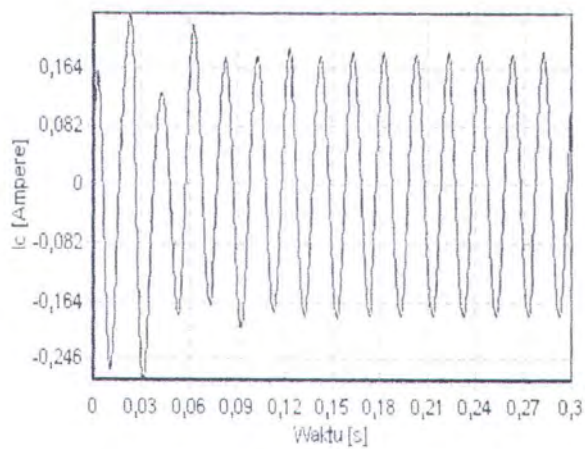


Respon sistem dengan $K_p : 0.00008$ $K_i : 8$ $a : 1$ $b : 0.3$

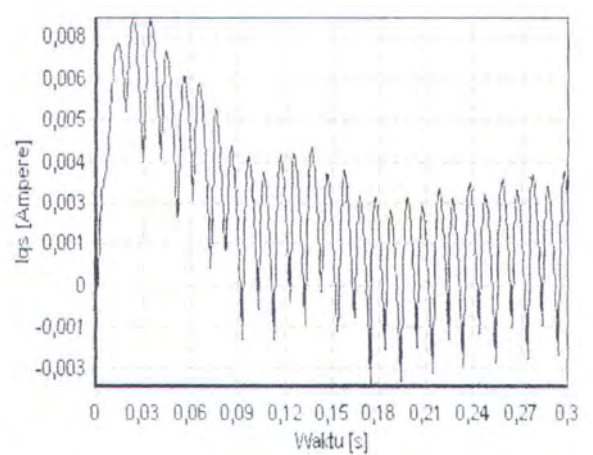
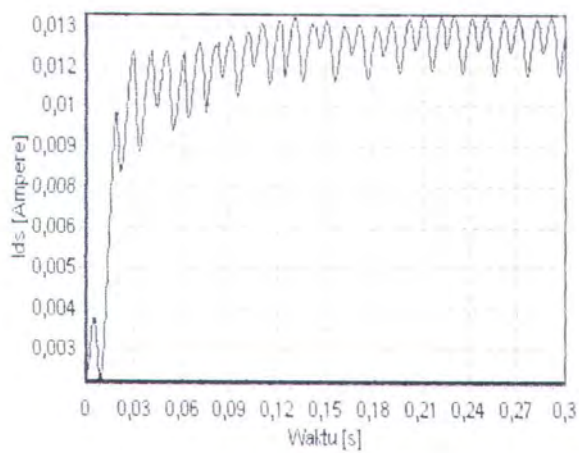
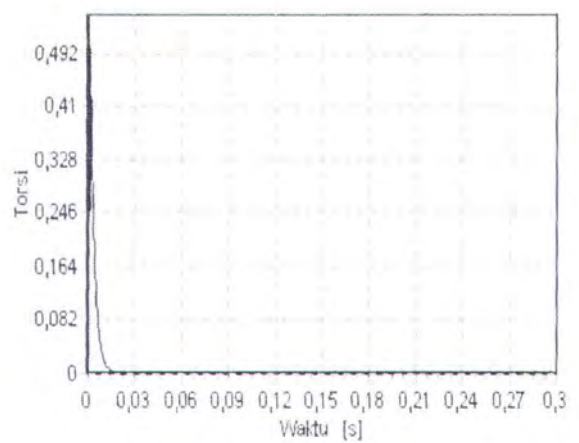
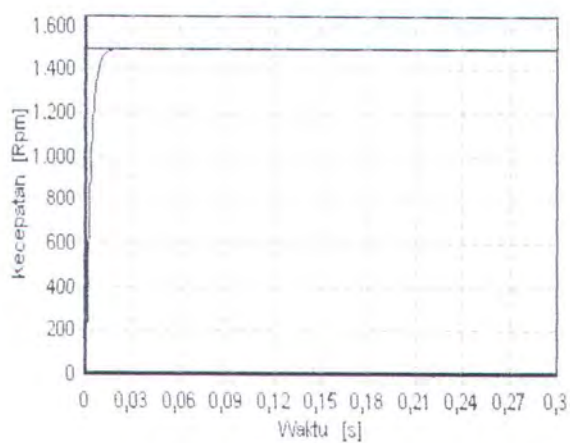
LAMPIRAN

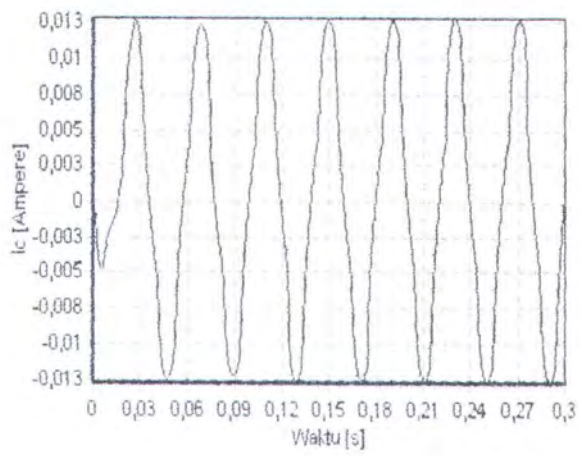
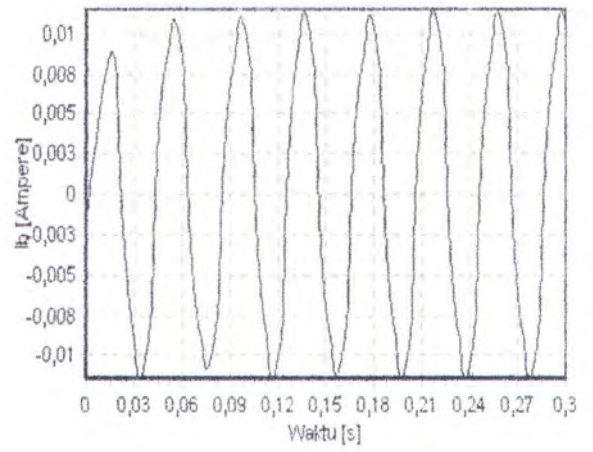
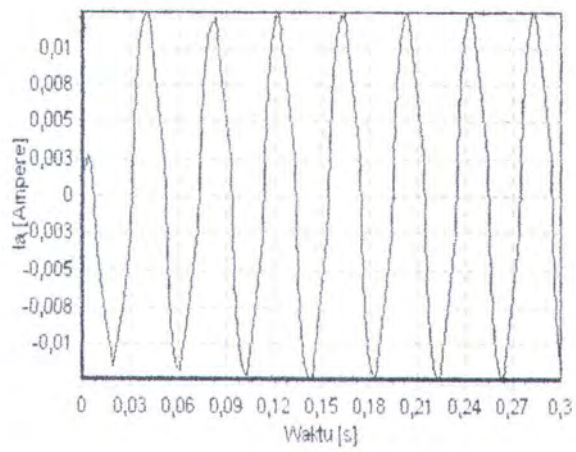
Hasil simulasi motor induksi *open loop* dengan frekuensi tegangan input 50 Hz



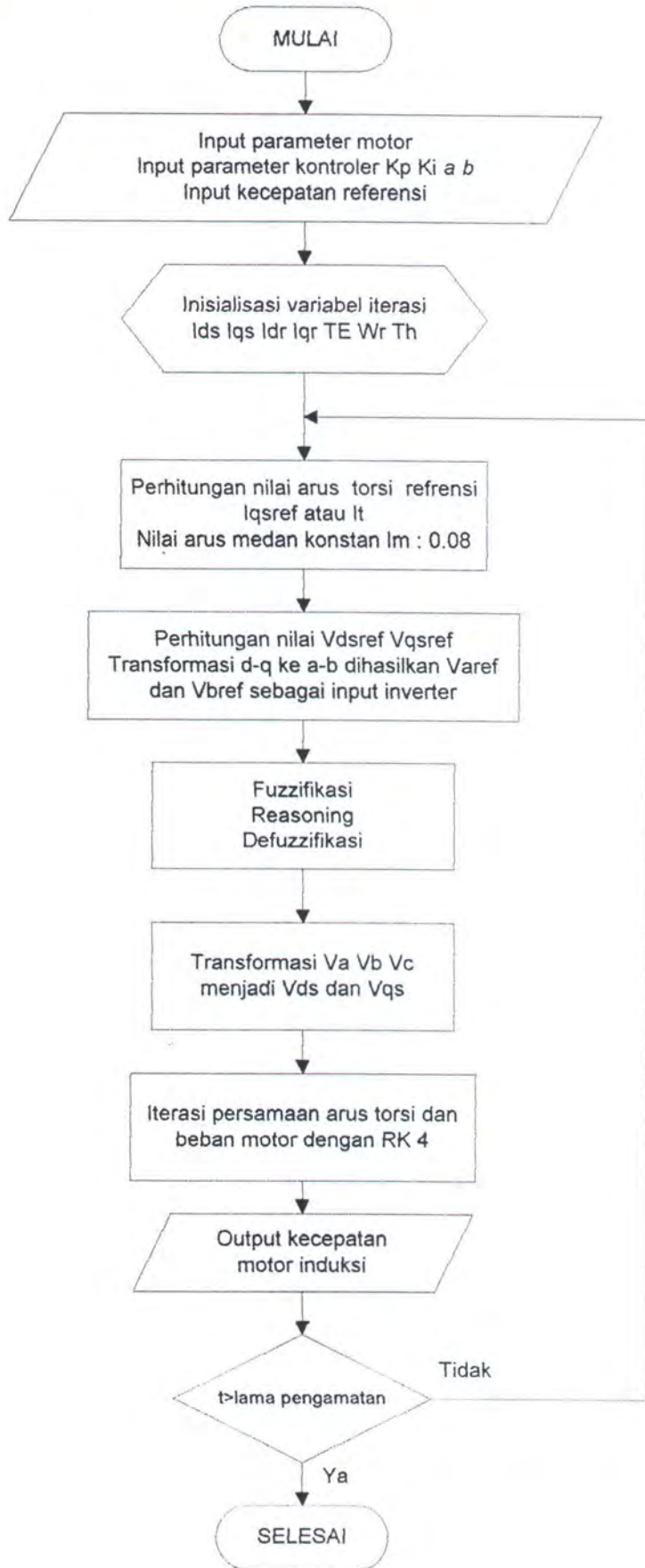


Hasil simulasi motor induksi dengan kontroler dan inverter fuzzy logic pada kecepatan input 1500 Rpm





LAMPIRAN Diagram Alir Program Simulasi



BIODATA



Penulis dilahirkan di Lamongan pada tanggal 5 Januari 1976 dengan nama Karno. Penulis adalah anak ketiga dari tiga bersaudara dengan ayah bernama Triman dan ibu bernama Kastik.

Jenjang pendidikan yang pernah di tempuh Penulis adalah sebagai berikut :

1. SDN Sidomulyo I Deket Lamongan, tahun 1982 - 1988.
2. SMPN Deket Lamongan, tahun 1988 - 1991.
3. SMAN 2 Lamongan, tahun 1991 - 1994.
4. Jurusan Teknik Elektro FTI ITS diterima melalui UMPTN tahun 1994.

Penulis selama studi aktif sebagai asisten di Laboratorium Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan.

